

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Zvyšování přesnosti při frézování tvarových ploch

Increasing Accuracy of Free Form Surface Milling

Student:

Bc. Ondřej Večeřa

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.

Ostrava 2017

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ondřej Večeřa**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **2303T002 Strojírenská technologie**
Specializace: **20 Strojírenská technologie**
Téma: **Zvyšování přesnosti při frézování tvarových ploch
Increasing Accuracy of Free Form Surface Milling**
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor stávajících strategií obrábění tvarových ploch.
2. Porovnání a technický rozbor 3osého a 5osého frézování.
3. Rozbor přesnosti obrábění u 3osého a 5osého frézování.
4. Závěry pro realizaci v praxi.

Seznam doporučené odborné literatury:

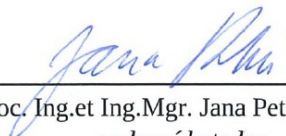
- [1] SADÍLEK, M. *CAM systémy v obrábění I. - II. doplněné vydání*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2010, 138 s., ISBN 978-80-248-2278-4.
[2] SADÍLEK, M. *Počítačová podpora výroby*. VŠB – TU Ostrava, 2011, 80 s., Dostupné na: http://www.346.vsb.cz/studijni_literatura.html.
[3] AB SANDVIK COROMANT - SANDIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praktiky*. Překl. M. Kudela. 1. vyd. Praha : Scientia, s. r. o., 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN 91-972299-4-6.
[4] SADÍLEK, M.; KOSAŘ F. *Řešené praktické příklady v CAM systému Mastercam*. VŠB – TU Ostrava, 2011, 169 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Marek Sadílek, Ph.D.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D.
vedoucí katedry

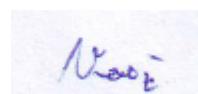



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne: 15.5.2017

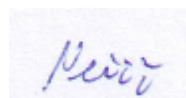


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- Jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne: 15.5.2017.....



.....
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Ondřej Večeřa

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Za Zahradami 14, Šternberk 78501

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval za spolupráci Katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologie. Děkuji také doc. Ing. Markovi Sadílkovi, Ph.D za cenné rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat. Práce byla podpořena ze Studentské grantové soutěže Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v rámci projektů SP2017/147 Specifický výzkum v oblasti výrobních technologií a SP2017/149 Výzkum produktivních a ekologicky úsporných výrobních technologií s cílem zvýšit a podpořit vědecko-výzkumné aktivity studentů doktorských a navazujících magisterských studijních programů ve spolupráci s akademickými pracovníky.

Anotace diplomové práce

VEČEŘA, Ondřej. Zvyšování přesnosti při frézování tvarových ploch. Diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2017, 51 s. Vedoucí práce: Sadílek, M.

V diplomové práci je řešena problematika zvyšování přesnosti při frézování tvarových ploch. Primárním cílem diplomové práce je analýza přesnosti experimentálních vzorků obrobených metodou 3osého, 3+2osého a 5osého frézování. V úvodní části je zmíněn současný stav stávajících strategií obrábění tvarových ploch a technický rozbor 3osého a 5osého frézování. Následuje část rozboru přesnosti obrábění u 3osého a 5osého frézování. Závěrečná část se věnuje závěrům pro realizaci v praxi.

Annotation of master thesis

VEČEŘA, Ondřej. Increasing Accuracy of Free Form Surface Milling. Master Thesis. Ostrava : VŠB – Technical university of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2017, 51 p. Thesis head: Sadílek, M.

The master thesis deals with the issue of increasing accuracy in milling of shaped surfaces. The primary aim of this master thesis is to analyze the accuracy of experimental samples machined by the 3 axis, 3 + 2 and 5 axis milling methods. In the introductory part, the current state of the existing surface machining strategies and the technical analysis of 3 axis and 5 axis milling are mentioned. Followed by part of the machining accuracy analysis for 3-axis and 5-axis milling. The final part deals with the conclusions for implementation in practice.

Obsah

Úvod.....	9
1. Rozbor stávajících strategií obrábění tvarových ploch	10
1.1 Frézování tvarových ploch podle orýsování	11
1.2 Frézování tvarových ploch tvarovými frézami	11
1.3 Frézování tvarových ploch pomocí otočného stolu.....	13
1.4 Frézování tvarových ploch kopírováním.....	13
1.4.1 Obrysové kopírování.....	14
1.4.2 Prostorové kopírování	14
1.5 Frézování tvarových ploch pomocí NC a CNC strojů	15
2. Porovnání a technický rozbor 3osého a 5osého frézování	17
2.1 3osé frézování tvarových ploch	17
2.2 5osé frézování tvarových ploch	20
2.3 Styly frézování tvarových ploch s ohledem na polohu osy nástroje vůči obrobku.	25
2.3.1 Popis frézování bez změny polohy osy nástroje vůči obrobku	25
2.3.2 Popis frézování se změnou polohy osy nástroje vůči obrobku	26
3. Rozbor přesnosti obrábění u 3osého a 5osého frézování	28
3.1 Porovnání s výchozím modelem	35
3.1.1 Porovnání 3osého a 3+2osého frézování.....	36
3.1.2 Porovnání 3osého a 5osého frézování.....	37
3.2 Porovnání s obrobeným modelem.....	38
3.3 Porovnání s výchozím modelem v programu Mastercam	39
3.4 Časové porovnání.....	42
4. Závěr	44
Seznam obrázků	45
Seznam tabulek	47
Seznam použité literatury.....	48
Seznam příloh	51

Seznam použitých značek

CAM	Computer Aided Manufacturing (počítačem podporovaná výroba)	[-]
CNC	Computerized Numerical Control (počítačové číslicové řízení)	[-]
NC	Numerical Control (číslicové řízení)	[-]
CAD	Computer Aided Design (počítačem podporovaný návrh)	[-]
d_{eff}	efektivní průměr frézy	[mm]
v_{ceff}	efektivní řezná rychlost	[m.min ⁻¹]
v_c	řezná rychlost	[m.min ⁻¹]
R_a	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu drsnosti	[μm]
R_z	největší výška profilu drsnosti	[μm]
s_a	plošná drsnost	[μm]
f_{min}	posuv za minutu	[m.min ⁻¹]
f_z	posuv na zub	[mm]
s_p	přísuv	[m.min ⁻¹]
n	otáčky vřetene	[min ⁻¹]
s_o	posuv pro Odjetí	[m.min ⁻¹]
a_p	hloubka řezu	[mm]
a_r	šířka řezu	[mm]

Úvod

V dnešní době plné inovací a složitých tvarů je snaha dělat věci co nejrychleji, nejefektivněji a hlavně nejlevněji, protože čas jsou peníze. Ještě v nedávné době bylo potřeba různé složité tvary obrábět na více upnutí nebo je dokončovat ručně. S rozvojem techniky frézovacích center přišlo na trh víceosé frézování.

Díky tomuto dokážeme dnes obrábět velice složité tvary např. různé formy nebo zápustky na jedno upnutí. U klasického 3osého obrábění není šance se do některých míst bez náklonu nástroje dostat a na řadu přichází právě víceosé obrábění. Mnoho publikací potvrzuje výhody 5osého frézování oproti 3osému. Rychlejší obráběcí časy, kvalitnější povrch a možnost naklonění nástroje pro obrobení těžko přístupných míst favorizuje tento způsob.

Zbývá tedy otázka o jaký úhel je nejefektivnější nástroj naklonit z hlediska přesnosti. Právě těmito úhly se bude tato diplomová práce zabývat.

1. Rozbor stávajících strategií obrábění tvarových ploch

Ve strojírenství se často vyskytují součásti, které se svým tvarem liší od tvaru těles pravidelných, jako jsou například válec, kužel, hranol a jiné. Tyto součásti mají obrysové plochy různě zakřivené a mluvíme tedy o tvarové ploše. Od vzniku samotného frézování se zabýváme vývojem technologie výroby tvarových ploch. Frézování, jakožto nejstarší metoda třískového obrábění, při které nám břity otáčejícího se nástroje odebírají materiál z obrobku. Posuv nejčastěji koná obrobek a to ve směru kolmém k ose nástroje. [4],[5]

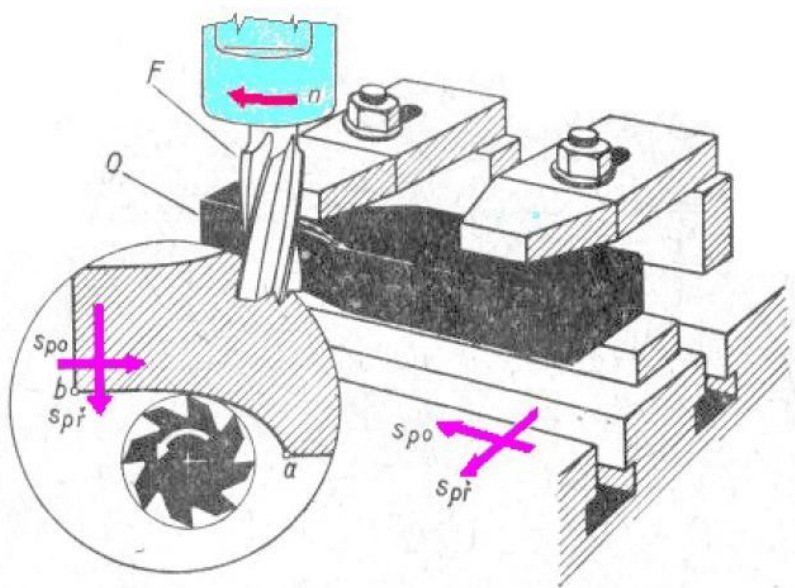
Ze začátku výroby tvarových ploch se nejčastěji využívalo tvarování samotné frézy. Fréza svým specifickým tvarem vytvořila opačnou geometrii v materiálu. S postupem času se začali k výrobě tvarových ploch používat stroje, jako jsou konzolové univerzální frézky, které dovolují natočení obrobku nebo frézovací hlavy. V době nástupu počítačové techniky a rozvoje elektrotechniky se tyto nové technologie aplikovaly na frézky a začaly vznikat jedny z prvních numericky řízených strojů. S postupem vývoje číslicového řízení a jeho aplikace do výrobních strojů začal vznikat nový druh a to takzvané obráběcí centra nebo jinak řečeno CNC frézky. [5]

V současné době na frézkách obrábíme tvarové plochy následujícími způsoby:

- Podle orýsování
- Tvarovými frézami
- Pomocí otočného stolu
- Kopírováním
- Pomocí NC a CNC strojů

1.1 Frézování tvarových ploch podle orýsování

Tento způsob (obr. 1) se používá zejména v kusové výrobě. Orýsovaný tvar se zpravidla frézuje běžnými nástroji, čelními válcovými frézami s válcovou nebo kuželovou stopkou s použitím běžného upínacího zařízení. Frézuje se ručně, to znamená, že výsledný pohyb je realizován ručně sdružením podélného a příčného posuvu. Hlavním faktorem pro správnost a jakost obrobené plochy je manuální zručnost a šikovnost příslušného pracovníka. [4],[6],[8]



Obrázek 1 - Frézování tvarových ploch podle orýsování

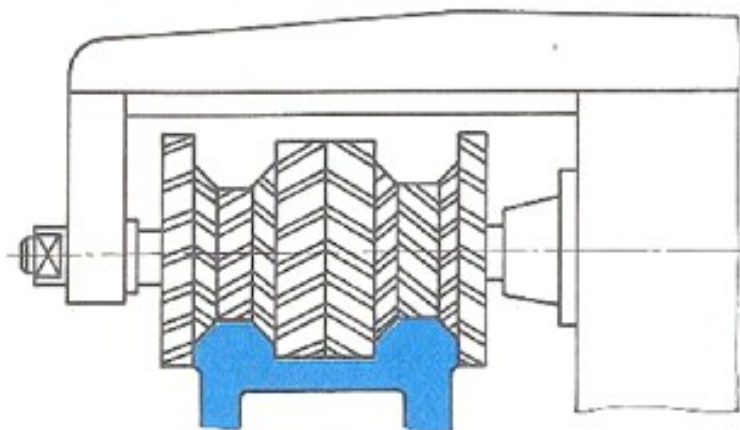
1.2 Frézování tvarových ploch tvarovými frézami

U tohoto typu výroby tvarové plochy je řezný nástroj tvarová fréza (obr. 2). Její tvar je odvozen od tvarových ploch, které vyrábíme. Používají se většinou pro obrábění kratších tvarových ploch, nejčastěji k obrobení poloměrového zaoblení v kusové i sériové výrobě. Některé speciální tvarové frézy pro výrobu velmi složitých tvarů je možno použít pouze v sériové výrobě a to z ekonomických důvodů. Výhodou tvarové frézy je možnost obrobení složité plochy jedním průchodem nástroje při zachování přesnosti tvaru. Nevýhodou této metody není jen vysoká pořizovací cena ale i menší výkon. Materiál je z obrobku odebírán dlouhým břitem, s nulovým úhlem čela což nám způsobuje větší řezný odpor a je zapotřebí obrábět menšími řeznými rychlostmi a posuvy. [6],[4],[8]



Obrázek 2 - Tvarové frézy

Širší a členitější tvarové plochy jako jsou například lože obráběcích strojů, se frézují tvarovými frézami složenými (obr. 3). Jsou sestaveny z několika jednoduchých tvarových fréz upnutých na jednom trnu. Pokud se jedna z použitých fréz otupí, musí se o stejnou hodnotu brousit i nástroj, který ještě otupen není, aby byla dodržena rozměrová a tvarová přesnost. [8],[6],[4]



Obrázek 3 - Tvarová fréza složená

1.3 Frézování tvarových ploch pomocí otočného stolu

Tento způsob se používá při frézování tvarových ploch, které bývají určeny poloměrem, středovým úhlem popřípadě tam kde je velký poloměr zaoblení. Otočný stůl (obr. 4) je kruhová otočná deska, která se otáčí kolem svislé osy. Je opatřena upínacími drážkami pro upínání obrobků. Upínání obrobků lze realizovat buď přímo na desku otočného stolu pomocí upínek nebo s využitím tří až čtyřčelistového sklíčidla či pomocí běžných strojních svěráků. Ve všech zmíněných případech se musí zajistit souosost osy obrobku a osy stolu. Využívá se k tomuto upnutý hrot ve vřetenu frézky nebo číselníkový úchylkoměr. [4],[6],[8],[7]



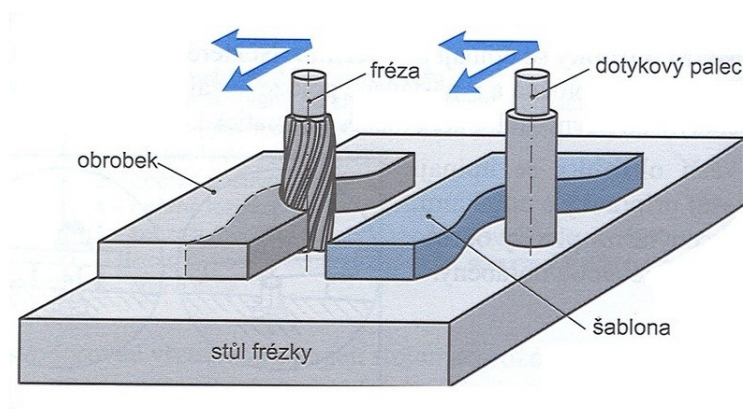
Obrázek 4 - Otočný stůl

1.4 Frézování tvarových ploch kopírováním

Frézování tvarových ploch pomocí kopírování se používá hlavně v sériové výrobě. Je to velmi levný a jednoduchý způsob výroby složitých tvarových ploch při zachování vysoké přesnosti. Po seřízení a nastavení stroje mohou tuto práci vykonávat i méně kvalifikovaní zaměstnanci. Kopírování rozdělujeme na obrysové (obr. 5) a prostorové (obr. 6). [4],[6],[8]

1.4.1 Obrysové kopírování

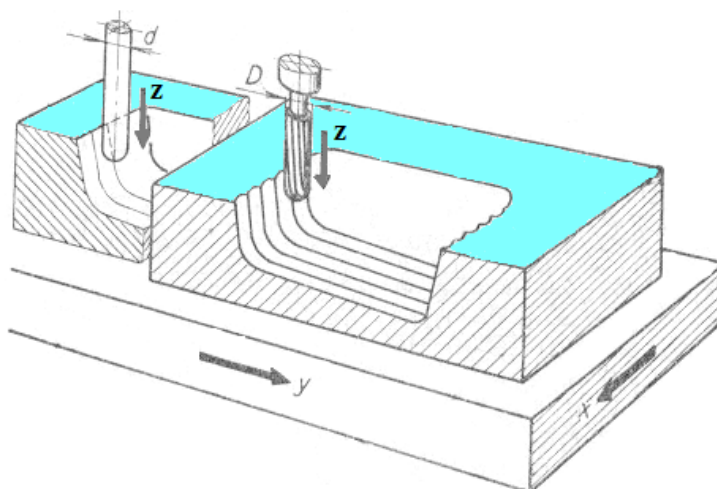
Nezbytné pohyby jsou řízeny dotykovým palcem, který sleduje řídicí plochu šablony. Především se tento způsob využívá v sériové výrobě například při výrobě zápusťek nebo vaček. [4],[6],[8]



Obrázek 5 - Obrysové kopírování

1.4.2 Prostorové kopírování

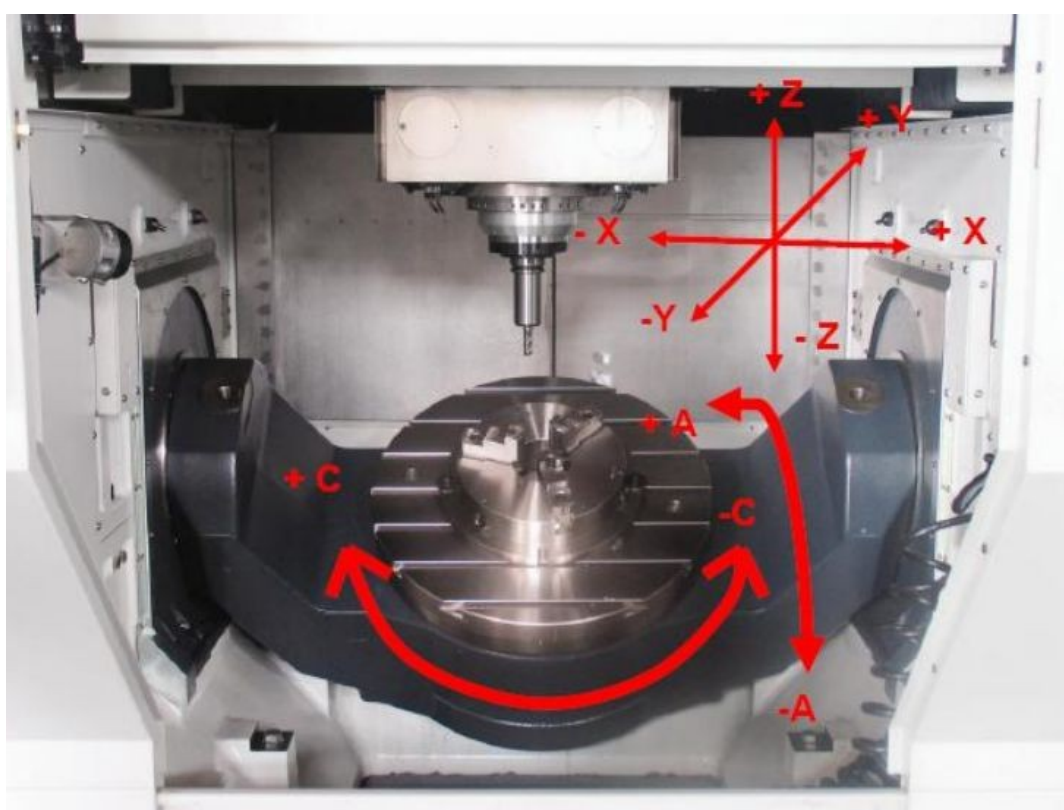
Při prostorovém kopírování je dotykový palec neustále ve styku s kopírovaným obrobkem (modelem). Výsledný tvarový pohyb je zajištěn skládáním podélného a příčného pohybu. Zabezpečení neustálého dotyku palce s řídicí plochou obrobku (modelu) je realizován různým způsobem. Nejčastěji se využívá pružina nebo závaží. [4],[6],[8]



Obrázek 6 - Prostorové kopírování

1.5 Frézování tvarových ploch pomocí NC a CNC strojů

Moderní frézovací stroje mají plynule měnitelné posuvové pohyby a jsou vybaveny polohovacím upínacím stolem nebo otočnou frézovací hlavou. Umožňuje nám to obrábět tvarově velmi složité součásti. Tyto obráběcí centra používají všechny různé druhy a typy fréz a dovolují automatickou výměnu nástrojů. Možnost frézování tvarových ploch je závislé na možnostech řídicího systému. Tyto plochy je možno obrábět ve 2D prostoru 3D, 4D, 5D eventuálně i ve více osách. Pohyb nástroje je realizován současně v několika osách (obr. 7). Tuto činnost zabezpečuje interpolátor a u CAD/CAM systému je dráha nástroje dána výkresem nebo modelem. [4],[8]



Obrázek 7 – Znázornění os na CNC obráběcím centru

Číslicové řízení výrobní techniky přineslo do frézování úplně nové možnosti. Díky pohybu frézy ve 3 až 5 osách současně dává technologovi možnost získat kvalitněji obrobený povrch oproti frézování řádkovacím (kopírovacím) způsobem. Víceosé souvislé frézování vyžaduje použití CAM systému, který uživateli vygeneruje NC program pro následné obrobení požadovaného tvaru. Na kvalitě CAM systému velmi záleží. Pro perfektní obrobení tvaru nám CAM systémy umožňují nastavit osu několika různými způsoby. [4],[8]

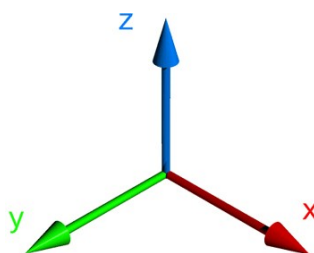
Kromě možností nastavení osy nástroje by měl CAM systém obsahovat dostatek obráběcích strategií (technologií) pro dokonalé obrobení různých částí modelu, aby vždy byla zajištěna dobrá kvalita povrchu. S tím souvisí i možnosti použití 3osých obráběcích strategií i pro 5osé obrábění nebo eventuálně převádět 3osé dráhy na víceosé dráhy nástroje. [4],[8]

V poslední době přibývají nové funkce jako automatický odklon sestavy nástroje v místech, kde by potenciálně hrozila kolize nástroje s obrobkem. Dále je to proměření a kontrola nástroje na opotřebení bříty anebo možnosti pro vyhlazení osy nástroje, které eliminují zbytečné pohyby rotačních os obráběcího stroje, které prodlužují čas obrábění. Některé CAM systémy obsahují specializované technologie (strategie) pro obrábění lopatkových kol, turbín, nebo uzavřených kanálků. Tyto funkce velmi výrazně zjednodušují a urychlují celý proces programování a umožňují efektivně využít potenciál obráběcího stroje. [4],[8]

2. Porovnání a technický rozbor 3osého a 5osého frézování

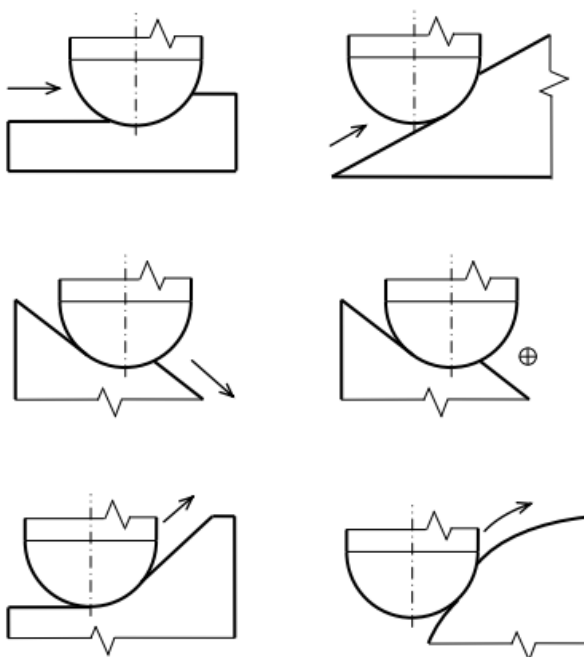
2.1 3osé frézování tvarových ploch

Frézování kopírovací nebo taky jinak nazývané frézování 3osé je běžná metoda CNC obrábění tvarových ploch. Nástroj se pohybuje současně pouze ve třech směrech. Tento způsob lze provádět na tříosých CNC frézovacích centrech. Pro řízení těchto CNC strojů se nejčastěji používá tříosý souřadnicový systém (obr. 8) s osami X, Y, Z, kterými se řídí pohyb nástroje oproti obrobku. [25],[3],[9]



Obrázek 8 - Souřadný systém

Na obrázku č.9 jsou zobrazeny příklady typického obrábění kulovou frézou na 3osých CNC frézovacích strojích se znázorněním směru posuvu nástroje. [25],[3],[9]



Obrázek 9 - Typické příklady obrábění kulovou frézou

Je potřeba si stanovit základní vztažné body (obr. 10) jaké jsou:

M – nulový bod stroje – je definován výrobcem a jedná se o počátek souřadnicového systému stroje.

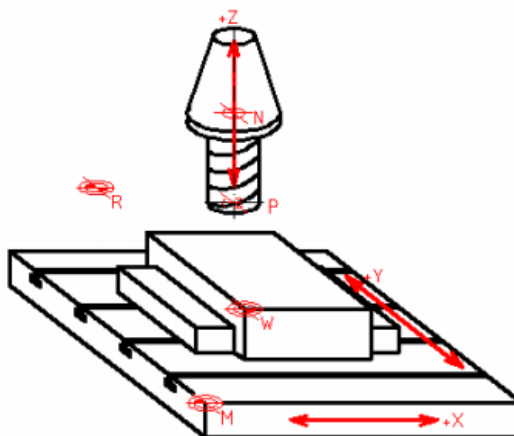
R – referenční bod je také stanoven výrobcem a slouží k nalezení nulového bodu stroje. Umožňuje přesné určení polohy nástroje v souřadném systému

W – nulový bod obrobku – je volen programátorem a jeho poloha je vztahová k nulovému bodu stroje. Všechny programované dráhy nástroje se k němu vztahují.

P – nulový bod nástroje – ten je stanoven programátorem a například u frézy leží tento bod na čele a v ose nástroje.

C – výchozí bod programu – je stanoven programátorem a leží mimo obrobek

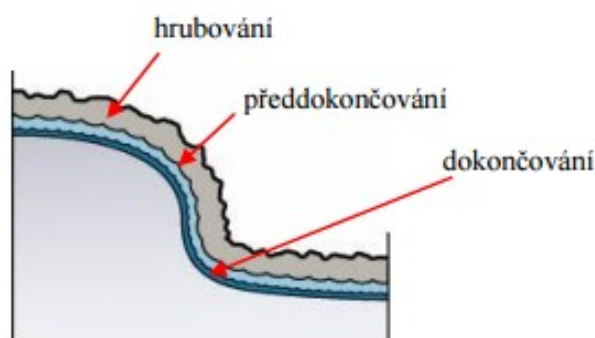
A – dorazový bod je stanoven programátorem



Obrázek 10 - vztažné body

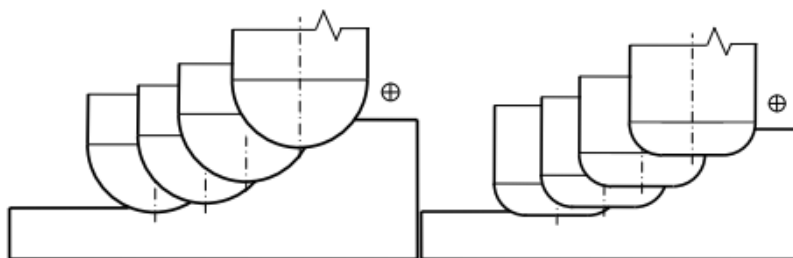
Typický pracovní postup při 3osém frézování například forem je odebrání velkého množství materiálu pomocí nástroje o velkém průměru na začátku frézovacího procesu. Mluvíme tedy o operaci hrubování. Při následujících obráběcích cyklech se postupně zmenšuje průměr nástroje i množství odebíraného materiálu. Tento proces se děje tak dlouho, dokud nemáme na obrobku konstantní přírůstek na obrobení. Tyto cykly nazýváme zbytkové hrubování, dohrubování a předdokončování. [25],[3]

Dále následují strategie dokončovací, při nichž je konstantní přídavek na obrobku odebrán tak aby bylo dosaženo konečného tvaru součásti. Může se stát, že na obrobku budou místa, která nejsou obrobena. Proto následuje poslední etapa, při které je odebrán zbytkový materiál. Mluvíme nejčastěji o odstranění zbylého materiálu z rohů, který nebyl odebrán z důvodu špatného přístupu nástroje nebo velkého průměru frézy. [25],[3]



Obrázek 11 - Jednotlivé vrstvy při odebírání materiálu

Pro zajištění bezproblémového obrábění a kvality obrobku je nutné u hrubování, předdokončování a dokončování (obr. 11) odebrat stále stejnou tloušťku materiálu. Při odebírání materiálu tvarové plochy kulovou nebo stopkovou frézou s rádiusem, nastává vlivem šířky řezu, zakřivení povrchu a rádiusu nástroje, ke vzniku výstupků (obr. 12) na povrchu obrobku. [25],[3],[11]



Obrázek 12 - Znáznorněné výstupky na povrchu obrobku

2.2 5osé frézování tvarových ploch

Frézování 5osé obsahuje technologii frézování s využitím více jak tří os. Obecně známé jako frézování ve více jak 3 osách současně, nicméně pro definici 5tiosého frézování není současný pohyb ve zmiňovaných osách podmínkou. 5osé frézování je velice progresivní CNC technologií obrábění tvarových ploch. [25],[3]

Během plynulého frézování se nástroj může pohybovat ve všech pěti osách současně (obr. 13). Pomocí plynulého natáčení vřeteníku, obrobku nebo rozdělením natáčení mezi vřeteník a obrobek je možno obrábět plochu s jakoukoli orientací. Obrábění pomocí souvislých (plynulých nebo také kontinuálních) 5 os umožňuje současný pohyb lineárních i rotačních os obráběcího centra. Lineární pohyby se realizují podle 3 os – X, Y, Z (jako u běžného 3osého obrábění) a navíc se k těmto osám přidávají pohyby rotačních os A, B, C (vždy dvě z nich). [25],[10],[3]



Obrázek 13 - Souřadnicový systém 5osého obrábění

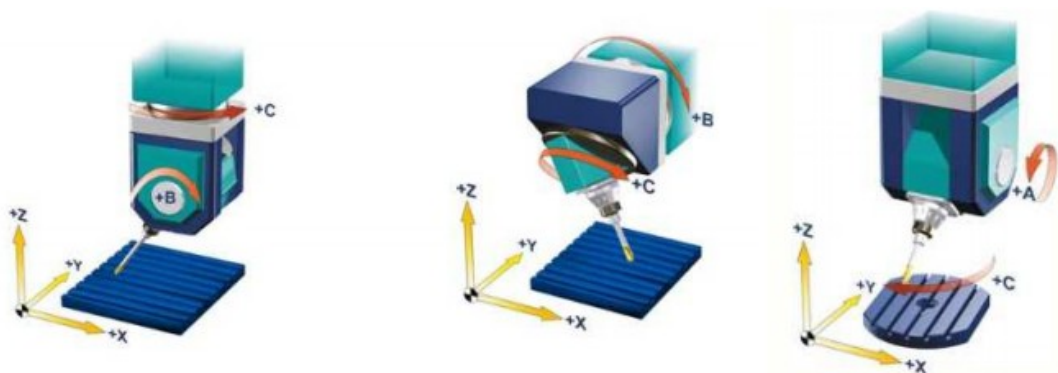
V praxi se lze setkat s různými druhy kinematických konfigurací uspořádání lineárních a rotačních os na stroji. Mezi nejběžnější patří koncepce stůl-stůl a hlava-hlava. [25],[10],[3]

U strojů s koncepcí stůl-stůl (obr. 14) jsou rotační pohyby azimutu i elevace zajištěny rotačně sklopným stolem obráběcího stroje jak je zobrazeno na obrázku níže. Výhodou této koncepce je tuhost a snadný odjezd od obrobku v jakékoliv fázi obrábění protože pohyb v ose Z je zajišťován vřetenem, které má vždy a pouze vertikální směr. Tyto 5osé obráběcí stroje s konceptem stůl-stůl mohou být vertikální nebo horizontální. [25],[10],[3]



Obrázek 14 - Kinematika 5osých obráběcích strojů s koncepcí stůl-stůl

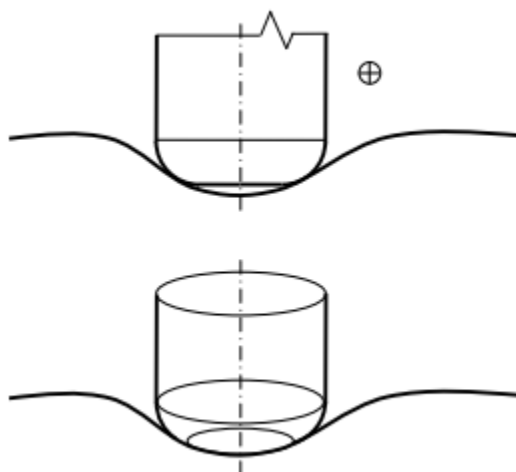
Koncepce strojů hlava-hlava (obr. 15) je účelná hlavně u strojů s velmi rozměrnými, nebo protáhlými obrobky, jejichž umístění na otočném a sklopném stole není reálné. Tato koncepce se často používá u portálových obráběcích strojů s velkými pojezdy. Nevýhodou je menší tuhost vřeteníku a také omezení úhlu azimutu. Záměnou frézovacího nástroje za řeznou hlavici laseru, plazmy nebo hlavici na řezání vodním paprskem, vznikne širší využití těchto obráběcích strojů. [25],[10],[3]



Obrázek 15 - Kinematika 5osých obráběcích strojů s koncepcí hlava-hlava

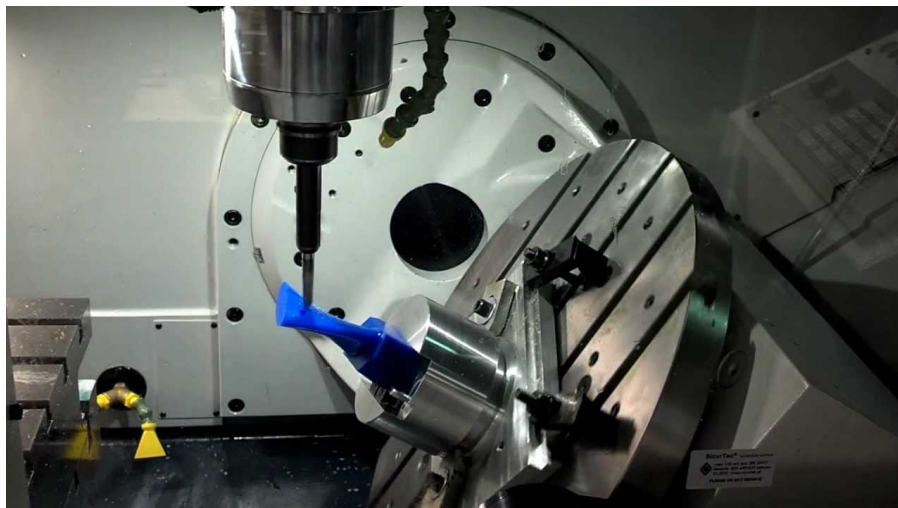
Použitím 5osého simultánního frézování lze docílit obrobení takových částí zakřiveného povrchu, které nemohly být obrobeny klasickou metodou 3osého frézování. Zejména pak tvarově složité drážky, kapsy a tvary, které obsahují podkos. Toto je možno provést bez nutnosti přepínání obrobku nebo změny nulového bodu. Osa nástroje se může plynule měnit tak, aby bylo vždy dosaženo obrobené celého tvaru při zachování požadované kvality povrchu. [25],[10],[3]

Díky možnosti vyklonění nástroje lze zkrátit jeho vyložení, které vede ke zlepšení kvality povrchu a zvýšení životnosti nástroje. Využitím efektivního radiusu nástroje lze docílit kvalitnějšího obrobení součásti. (obr. 16) Díky této metodě docílíme lepší drsnosti povrchu, zvýší se přesnost obrobené plochy a v neposlední řadě se zkracuje celkový čas obrábění. [25],[10],[3]



Obrázek 16 - Efektivní využití radiusu nástroje

5 osé simultánní frézování umožňuje v rohu kontinuálně regulovat naklápění nástroje pro stopkovou frézu s rádiusem a docílit tak vysoké kvality povrchu. Vysoké produktivity lze dosáhnout použitím nejvhodnějšího sklonu osy nástroje vůči obráběnému povrchu pro každý bod povrchu. V praxi nejsou navrhované změny polohy osy nástroje rozšířeny, a to i přes svoje vysoké výhody. Aplikování náklonů os, vřeten a stolů výrobci CAM softwarů umožňují, ale neuvádí přesný postup nebo konkrétní hodnoty náklonů pro dosažení nejefektivnějšího obrábění. Příklad 5osého frézování zobrazen na obrázku č. 17. [25],[10],[3]



Obrázek 17 - příklad 5osého obrábění

Mezi základní výhody 5osého obrábění patří:

- Snížení celkového času výroby
- Možnost komplexního obrobení součásti
- Snížení počtu upnutí na opracování dílců – snížení možnosti chyby při seřizování
- Možnost použití kratších nástrojů pro docílené produktivnějšího obrábění a zvýšení trvanlivosti nástroje
- Zvýšení přesnosti výroby
- Možnost použití vyšších řezných a posuvových rychlostí
- Zlepšení funkčních vlastností obrobeného povrchu (drsnot povrchu, mikrotvrdost, zpevnění povrchové vrstvy atd.) díky obrábění mimo osový střed nástroje

Při použití 5osého plynulého frézování lze výše zmíněné výhody dále doplnit o:

- Možnost obrobení velmi složitých tvarů
- Odstranění procesu výroby nekonvenční technologie
- Možnost naklonění nástroje pro předcházení kolizí mezi nástrojem a držákem nástroje a obrobkem
- Možnost naklonění nástroje pro docílení lepšího přístupu k obráběné ploše (hlavně při obrábění hlubokých částí forem a zápustek)
- Možnost tvorby konstantního průřezu třísky
- Použití mnohem efektivnějších strategií v porovnání s 3 osým frézováním

Mezi nevýhody použití 5osého plynulého frézování lze zařadit:

- Vyšší pořizovací náklady (je zapotřebí obráběcí centrum, vybavení stroje, CAD/CAM systém, postprocesor, atd.)
- Vyšší nároky na programátora a obsluhu stroje
- Problematická vizualizace a větší možnost kolizí
- Vyšší náklady na opravu stroje a jeho příslušenství při možné kolizi

Je potřeba se zmínit o tzv. indexování. Mnoho obráběcích center mohou současně obrábět ve třech osách a v dalších dvou osách pouze polohovat součásti mimo samotný řez. Jak už bylo zmíněno, při 3osém frézování jsou používány tři lineární osy. Při 5osém polohovém frézování jsou přidány další dvě a to rotační osy. Tento způsob je často označován jako 3+2 obrábění. Toto obrábění odkazuje na tři lineární osy, které jsou současně ovládány a dvě rotační osy, pomocí kterých je možno vřeteník posunout na novou pozici a pak teprve začít obrábět. Poté, co se vřeteník přesune na novou pozici, začne klasické 3osé frézování. Při tomto typu obrábění se pohybuje pouze lineární osou nebo osou rotační. Tedy nelze provádět oba pohyby naráz. [25],[10],[3]

Touto metodou je vyráběno mnoho součástí, ale pro tento typ výroby forem a zápusťek není indexace efektivní. Tato metoda je efektivní pouze pro hrubovací fáze. Díky zablokování rotační osy dosáhneme větší tuhosti při hrubování. Obě rotační osy jsou nejprve nastaveny do požadované polohy a následně zablockovány. Poté dochází ke klasickému 3osému frézování. Díky tomuto zablokování dosáhneme větší tuhosti než při 5osém frézování. Tato metoda indexování při hrubování je tedy považována za přesnější než simultánní frézování v 5 osách. [25],[10],[3]

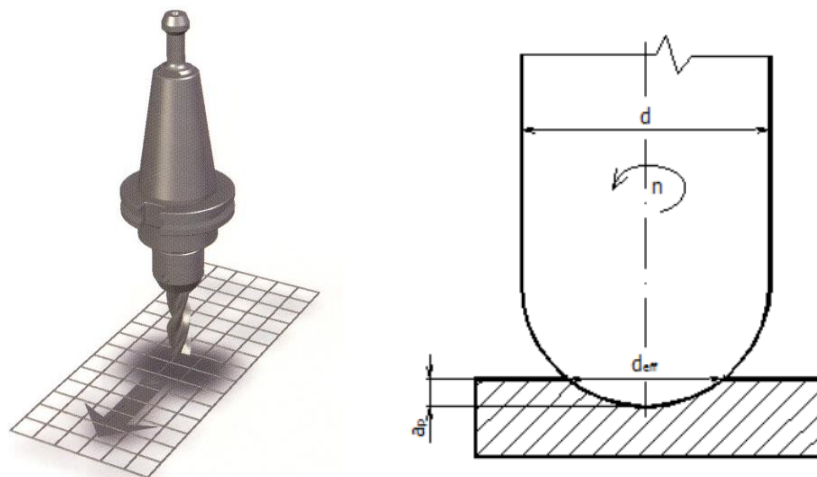
2.3 Styly frézování tvarových ploch s ohledem na polohu osy nástroje vůči obrobku.

Na vertikálních frézovacích centrech je dnes možno provádět dokončovací frézování dvěma způsoby. První je frézování bez změny polohy osy nástroje vůči obrobku a druhý způsob se nazývá frézování se změnou polohy osy nástroje vůči obrobku. [25],[9],[11]

2.3.1 Popis frézování bez změny polohy osy nástroje vůči obrobku

Během standardního frézování kulovými frézami, kdy úhel mezi obráběnou plochou a nástrojem je 90° , je na špičce kulové frézy nulová řezná rychlost v_c .

Fréza pouze v tomto místě zatlačuje materiál obrobku. Díky tomuto zde dochází k nežádoucím vlivům, jako jsou např. zvyšování teploty řezání, přechování třísky nebo zvýšení tvorby nárůstku. Tyto nežádoucí vlivy mají za následek zhoršení funkčních vlastností povrchu obráběného materiálu dále pak snížení trvanlivosti řezného nástroje (v nejhorším možném scénáři hrozí i vyštípnutí) a změnu výkonových a momentových hodnot procesu frézování. [25],[9],[11]

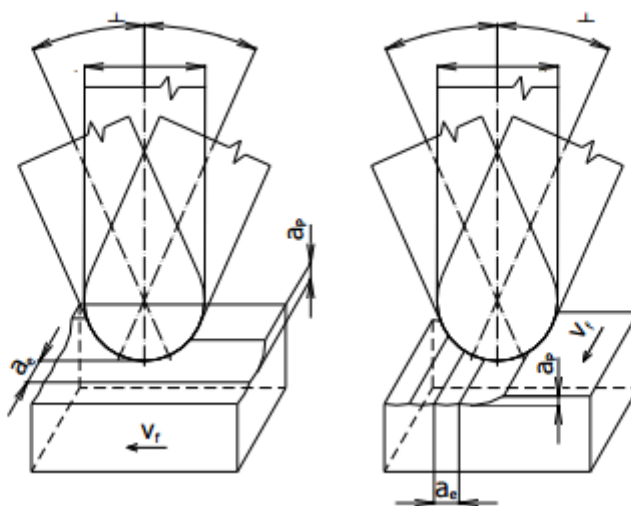


Obrázek 18 - Ukázka frézování standardním způsobem a znázornění efektivního průměru frézy

Pokud u obráběcího stroje není možno změnit polohu osy nástroje, zůstává úhel naklonění nástroje ve směru kolmém na posuv nulový a podstatně se snižuje efektivní průměr frézy d_{eff} (obr. 18). K tomuto dochází nejčastěji při malých hloubkách záběru a_p . Dále se podstatně snižuje efektivní řezná rychlost v_{eff} . [25],[9],[11]

2.3.2 Popis frézování se změnou polohy osy nástroje vůči obrobku

Při frézování s využitím plynulého naklápění řezného nástroje, nebo obrobku lze zmiňované nežádoucí vlivy popsané u frézování bez změny polohy osy nástroje zmírnit nebo dokonce i úplně vyloučit. Nejčastěji používaný termín v praxi je naklopení nástroje, nicméně správné je uvádět termín poloha osy nástroje vzhledem k obráběnému povrchu. Nejedná se pouze o náklon nástroje, ale může nastat situace, kdy se bude naklápět obrobek. Toto závisí na koncepci obráběcího centra. [25],[9],[11]



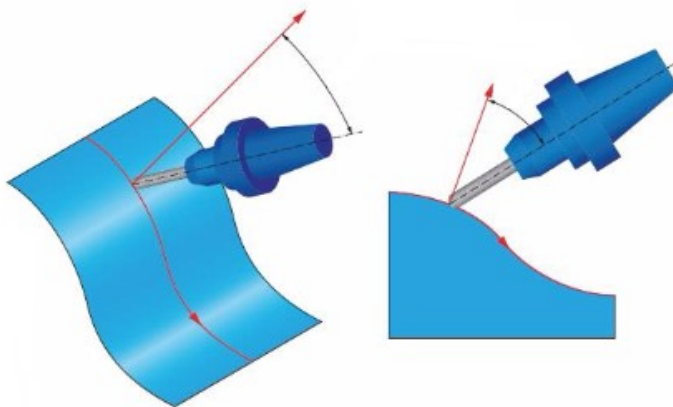
a) Naklopení ve směru posuvu

b) naklopení ve směru kolmém na posuv

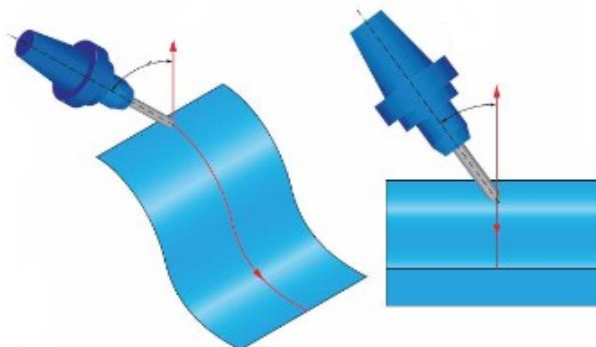
Obrázek 19 - Způsoby frézování s nakloněným nástrojem, a) naklopení ve směru posuvu, b) naklopení ve směru kolmém na posuv

Způsoby naklopení nástroje zobrazeny na obrázku č. 19. Jestliže je poloha osy nástroje ve směru posuvu je možno obrábět dvěma způsoby. Tyto způsoby jsou v praxi označovány jako tažený a tlačný nástroj (obr. 20,21). Tažený způsob obrábění zajišťuje tišší chod a zlepšuje se i kvalita obrobeného povrchu. Naopak u způsobu tlačný nástroj nejsou tyto výhody pozorovány. [25],[9],[11]

V odborných literaturách je uváděno použití úhlu polohy osy nástroje k normále obráběného povrchu v rozmezí 10 až 30°. Jiné literatury uvádí rozpětí 10 až 20° i že nejvhodnější poloha osy nástroje se pohybuje okolo 15°. [25],[9],[11]



Obrázek 20 - Naklopení ve směru posuvu (tažený nebo tlačný nástroj)



Obrázek 21 - Naklopení ve směru kolmém na posuv

U složitějších tvarových ploch je potřeba použít víceosé frézování pro udržení stále stejného úhlu naklopení nástroje od normály k obráběnému povrchu. V dnešní době se tyto případy vyskytují velice často, a proto nelze obrábět ve třech osách současně spolu s indexovaným naklopením čtvrté osy. [25],[9],[11]

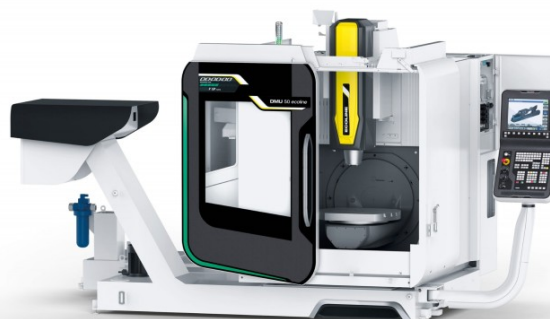
3. Rozbor přesnosti obrábění u 3osého a 5osého frézování

Pro tento experiment mi byl k dispozici univerzální 5osý frézovací stroj DMG MORI DMU 50 s řídicím systémem Heidenhain iTNC 530(obr. 22). Toto obráběcí centrum figuruje kinematickou konfigurací uspořádání lineárních a rotačních os na stroji v praxi označováno jako stůl – stůl. Program na frézování byl zhotoven v programu MasterCam odkud byl vygenerování NC kód a následně tento kód nahrán do stroje DMG.

Univerzální pětiosý frézovací stroj / Universal five axis milling machines DMG MORI DMU 50

DMG MORI

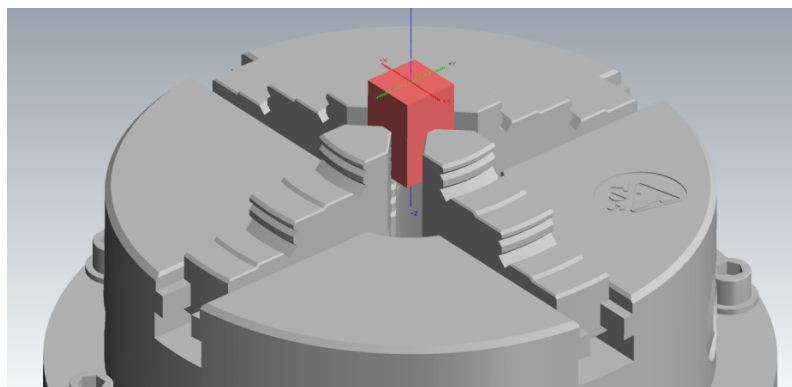
Základní parametry	rozměr otočného stolu	630 × 500 mm
	povolený průměr nástroje	do 130 mm
	povolená délka nástroje (od čela nástroje)	300 mm
	povolená hmotnost nástroje	6 kg
	pojezd v ose X	500 mm
Vřeteno (hlavní pohon)	pojezd v ose Y	450 mm
	pojezd v ose Z	400 mm
	rozsah otáček	20 až 18 000 min ⁻¹
	upínání dle DIN 69871	HSK-A63
	výkon (40/100 % zatížení)	35/25 kW
Pracovní stůl	točivý moment (40/100 % zatížení)	130/87 Nm
	tažná síla na nástroji	25 kN
	naklápěcí otočný stůl simultánní	630 × 500 mm
	rozsah naklápění	-5 až 110 °
	rotační osa	360 °
Posuvy	počet T drážek	7
	rozeč T drážek	63 mm
	šířka T drážek	14 mm
	centrovací otvor	30 H6 mm
	povolené zatížení stolu	300 kg
Zásobník nástrojů	přímé odměřování os	B, C a transformací rovin
	rychloposuv	24 000 mm min ⁻¹
	talířový	16 míst
	doba od upnutí k upnutí	11 s
	maximální přípustná váha nástrojů v zásobníku	80 kg
Chlazení	vnitřní přívod s papírovým pásovým filtrem	
	tlak čerpadla	40 bar
	průtok	23 l/min
	objem procesní kapaliny	600 l
	max. průtok	300 l/min
Rozměry stroje	jemnost filtrace	50 μm
	rozměry	1,5 × 1,3 × 1,7 m
	výška stroje	2 750 mm
	půdorysná plocha stroje (šířka × hloubka)	3 980 × 4 150 mm
	včetně dopravníků třísek	
Řídicí systém stroje	hmotnost stroje	4 480 kg
	Heidenhain iTNC 530 HSCI	
	Doplňkové vybavení	polokabina, 3D řídicí systém, DMG MORI Messenger, DMG ERGOline Control, provozní režim SmartNC, infračervená měřicí sonda PP 60 optical, Článkový dopravník třísek
	Odvod třísek	
	Instalované opce	Postprocessor odlaďený pro Mastercam



Financováno ze zdrojů Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie.

Obrázek 22 - Univerzální 5osý frézovací stroj DMG MORI DMU 50

Polotovaru pro daný experiment byl zvolen o rozměrech 40x40x25mm. Materiál polotovaru je dobře obrobitelná slitina hliníku EN AW-6060 – AlMgSi0,5 F19 a byl upnut do čtyř-čelistového sklíčidla na sloupu (obr. 23) s výhodou tuhosti upnutí.



Obrázek 23 - Upnutý polotovar v čtyř-čelistovém sklíčidlu na sloupu

První část hrubování obsahuje zarovnání čela a vyfrézování osazení. Pro tuto operaci byl použit nástroj od společnosti Sandvik a jedná se o čelní frézu pro frézování do rohu CoroMill® 390 (obr. 24).

- Řezný průměr frézy je 36mm.
- Počet řezných destiček – 3
- Maximální hloubka řezu – 10 mm
- Maximální otáčky – 29000 r/min
- Počet efektivních obvodových řezných hran – 3
- Zaoblení břitu $r = 0,8$ mm

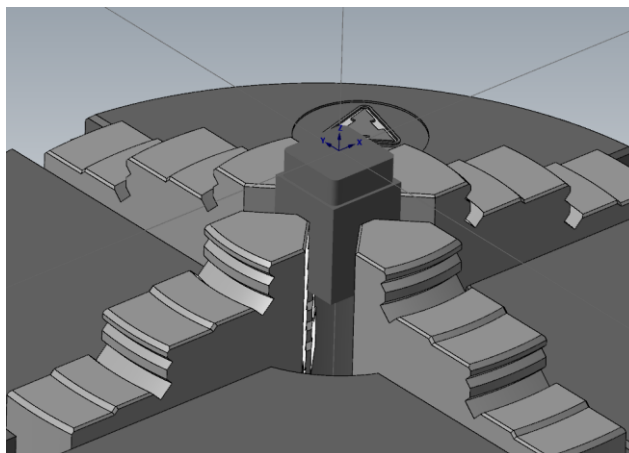


Obrázek 24 - Čelní fréza pro frézování do rohu CoroMill® 390

Hodnota posuvu na zub byla zvolena 0,2mm. Řezná rychlost pak 300m/min. Program MasterCam si po zadání těchto dvou hodnot sám dopočítal zbylé řezné podmínky. Došlo i k úpravě řezné rychlosti na optimálních 299,9434 m/min (tab. 1). Po zarovnání čela a vyfrézování odsazení bude obrobek vypadat následovně (obr. 25)

Řezné podmínky pro první část hrubování			
Název	Označení	Hodnota	Jednotka
Posuv	f_{\min}	1591,2	$[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$
Posuv na zub	f_z	0,2	$[\text{mm}]$
Přisuv	s_p	1000	$[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$
Otáčky	n	2652	$[\text{min}^{-1}]$
Řezná rychlost	v_c	299,9	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$
Posuv pro Odjetí	s_o	2000	$[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$
Hloubka řezu	a_p	4	$[\text{mm}]$
Šířka řezu	a_e	1	$[\text{mm}]$

Tabulka 1 - Řezné podmínky pro první část hrubování



Obrázek 25 - Náhled na obrobek po první části hrubování

Následuje druhá část hrubování a jedná se o nahrubování tvaru. Dochází zde ke změně nástroje. Pro tuto část byla použita monolitní karbidová stopková fréza CoroMill® Plura pro frézování do rohu také od společnosti Sandvik (obr. 26).

- Řezný průměr frézy - 6mm.
- Počet efektivních obvodových řezných hran – 2
- Maximální hloubka řezu – 9 mm
- Poloměr břitu r - 1mm



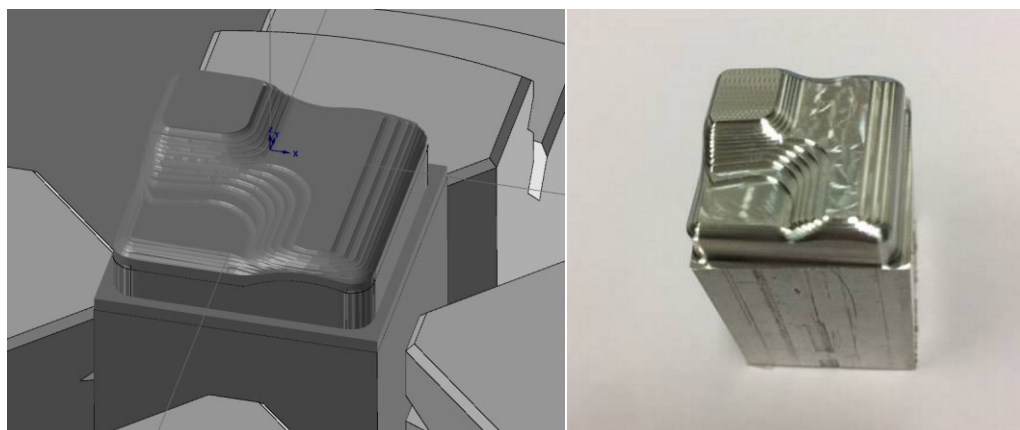
Obrázek 26 - Monolitní karbidová stopková fréza CoroMill® Plura pro frézování do rohu

Řezné podmínky pro tuto část hrubování se neliší příliš mnoho. Byla zvýšena řezná rychlost, a tudíž narostly otáčky a posuv při obrábění. Řezné podmínky je možno vidět v tabulce č. 2.

Řezné podmínky pro druhou část hrubování			
Název	Označení	Hodnota	Jednotka
Posuv	f_{\min}	5570	$[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$
Posuv na zub	f_z	0,2	$[\text{mm}]$
Přisuv	s_p	1000	$[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$
Otáčky	n	13925	$[\text{min}^{-1}]$
Řezná rychlost	v_c	349,9	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$
Posuv pro Odjetí	s_o	2000	$[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$
Hloubka řezu	a_p	0,5	$[\text{mm}]$
Šířka řezu	a_e	1	$[\text{mm}]$

Tabulka 2 - Řezné podmínky pro druhou část hrubování

Celkový čas hrubovacího cyklu činí 4:30 min. Čas byl měřen od prvního dotyku nástroje s povrchem obroku až po jeho poslední. Na obrázku č. 27 je náhled obroku po hrubovacím cyklu. Pro dokončovací cyklus, který je předmětem tohoto experimentu byl ponechán přídavek 0,2mm.



Obrázek 27 - Náhled na obrobek po hrubování(vlevo vygenerovaný model v MasterCamu, vpravo reálné foto)

Dokončovací cyklus byl proveden pomocí Monolitní karbidové stopkové frézy CoroMill® Plura s kulovým čelem taktéž od společnosti Sandvik (obr. 28).

- Řezný průměr frézy je 6mm.
- Počet efektivních obvodových řezných hran – 2
- Maximální hloubka řezu – 6 mm
- Maximální otáčky – 80000 r/min
- Poloměr břitu r - 3mm



Obrázek 28 - Monolitní karbidová stopková fréza CoroMill® Plura s kulovým čelem

Oproti hrubovacímu cyklu se posuv za zub zmenšil na 0,08 mm. V tomto případě se zadávali maximální otáčky a řezná rychlost byla automaticky vypočtena programem MasterCam(tab. 3). Limitní byli maximální otáčky stroje, které jsou 18000 r/min.

Řezné podmínky pro dokončovací cyklus			
Název	Označení	Hodnota	Jednotka
Posuv	f_{\min}	2800	[mm.min ⁻¹]
Posuv na zub	f_z	0,08	[mm]
Přísuv	s_p	1909	[mm.min ⁻¹]
Otáčky	n	17500	[min ⁻¹]
Řezná rychlost	v_c	329	[m.min ⁻¹]
Posuv pro Odjetí	s_o	1909	[mm.min ⁻¹]
Hloubka řezu	a_p	0,2	[mm]
Šířka řezu	a_e	0,08	[mm]

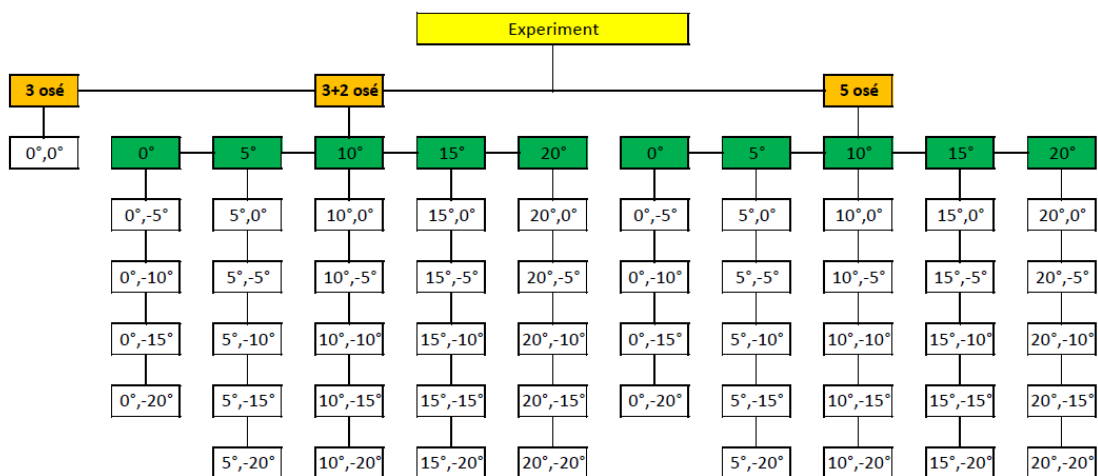
Tabulka 3 - Řezné podmínky dokončovacího cyklu

Nástroj byl upnut pomocí hydraulického adaptéru HSK se sklíčidlem CoroChuck™ od společnosti Sandvik (obr. 29). Hydraulické upnutí má oproti klasickému upnutí v kleštině mnoho výhod. Jedná se například o výborné tlumení vibrací, max. obvodová házivost je $\leq 0,003\text{mm} \Rightarrow$ umožňuje rovnoměrný záběr břitu nástroje a další. [12]



Obrázek 29 - Hydraulický adaptér HSK se sklíčidlem CoroChuck™ 930

Experiment se skládá ze tří částí. V první části byl obroběn vzorek pomocí frézování bez změny polohy osy nástroje vůči obrobku. Jedná se tedy pouze o tříosé frézování a úhel náklonu je tedy $0^\circ, 0^\circ$. Schéma experimentu je zobrazeno na obrázku č. 30.



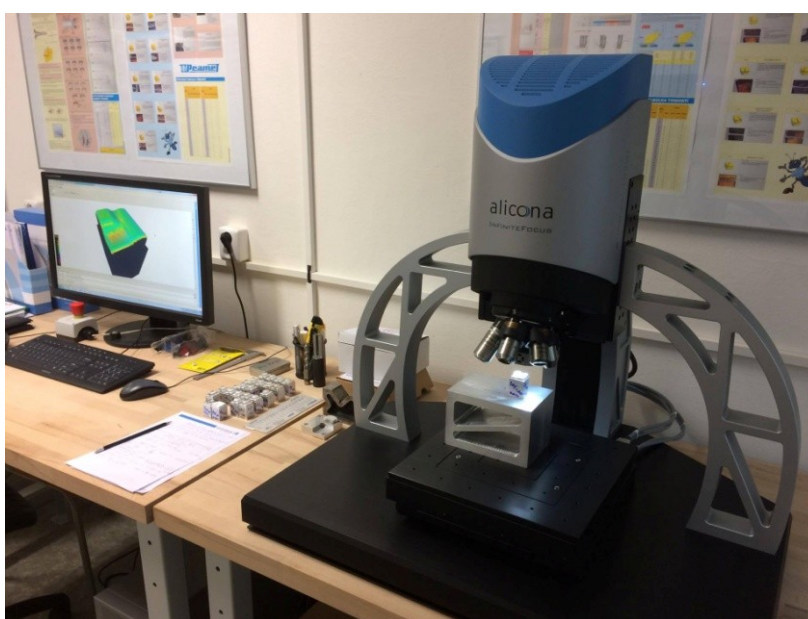
Obrázek 30 - Schéma experimentu

V druhé části bylo obrobeno 24 vzorků a oproti první části zde bylo použito frézování s využitím změny polohy osy nástroje takzvané 3+2osé obrábění. Pomocí os B a C byl nastaven stálý náklon a poté pokračovalo klasické 3osé frézování. Hodnoty úhlů náklonu ve směru posuvu jsou zvýrazněny zeleně a jde o tažený nástroj. Hodnoty v bílém políčku napravo jsou úhly naklopení ve směru kolmém na posuv.

Poslední část obsahuje taktéž 24 obroběných vzorků, ale tentokrát metodou 5osého frézování. Při 5osém frézování se do pohybu dostává všech 5 os (X, Y, Z, B, C). Podobně jako je tomu u 3+2osého frézování jsou zde nastaveny náklony ve směru posuvu a kolmo na posuv tak aby nástroj stále konal tažený pohyb.

Rozdíl proti 3+2osému frézování je ten, že nástroj sice má nastaveny úhly náklonů, ale sklon osy nástroje oproti normále k povrchu se mění v závislosti na tvaru plochy modelu. Toto je dost zásadní změna a předpokladem je efektivnější využití břitu a zlepšení tak kvality povrchu.

Samotné měření vzorků proběhlo na optickém tří-dimenzionálním mikroskopu Alicona Infinite Focus (obr. 31) využívající optickou metodu měření povrchu obrobku pro oblast mikro a nano rozsahu. Vertikální rozlišení je možné s přesností až 10nm. Tento přístroj umožňuje měřit plošné drsnosti, profilové drsnosti, tvaru profilu, 2D měření, měření úhlů na břitu, zaoblení břitu, drsnost břitu a diferenční měření. [13]



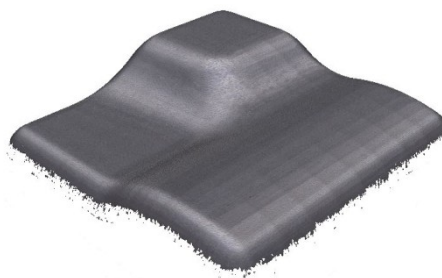
Obrázek 31 - Měřicí pracoviště Alicina

Měření je založeno na principu snímání objektu objektivem s velmi malou hloubkou ostrosti a postupnou změnou zaostřené vzdálenosti. Z nasnímaných 2D obrazů příslušný software následně složí 3D obraz naměřeného předmětu (obr. 32) a měření probíhá přímo na tomto obrazu. [13]

Tyto naskenované povrchy byly porovnány s výchozím modelem vytvořeným v inventuru a obrobeným modelem, který vygeneroval program MasterCam.

Oba tyto modely bylo potřeba uložit ve formátu stl jelikož systém Alicona nepodporuje výchozí formát inventuru ipt ani výchozí formát Mastercamu emcx-8. Základní tolerance při ukládání modelů do formátu stl byla nastavena na 0,024mm.

Z obavy skreslení výsledků a nepřesného porovnání byla tato velikost tolerance po domluvě s vedoucím diplomové práce změněna na hodnotu 0,0001mm.

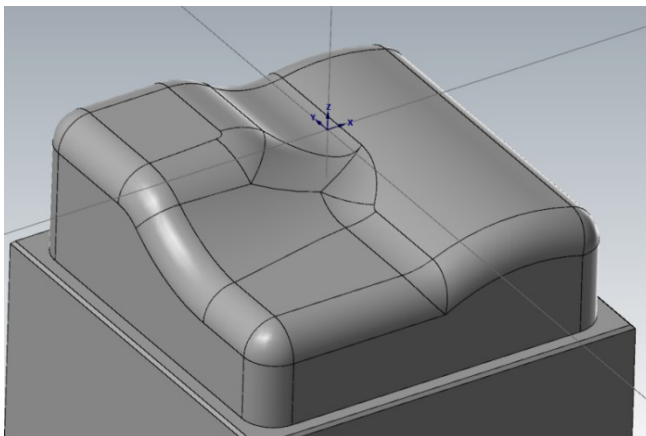


Obrázek 32 - Pohled na naskenovaný povrch

3.1 Porovnání s výchozím modelem

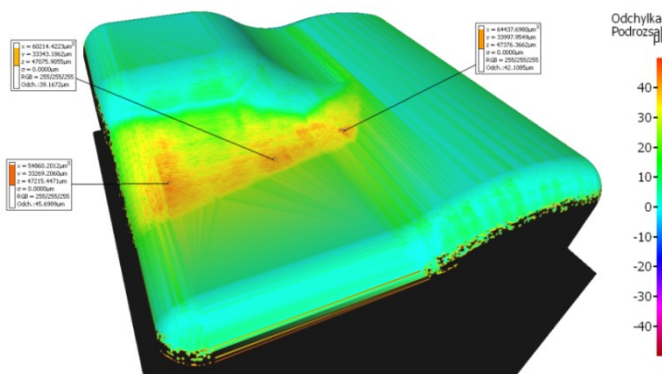
Velikost experimentálního modelu byla navržena s ohledem na délku měření jednotlivých kusů a možnostmi optického mikroskopu Alicona. Větší velikost vzorků by způsobila prodloužení času měření jednotlivých vzorků. Taktéž příliš vysoký tvar by mohl způsobit kolizi při snímání povrchu. Tvar modelu byl uzpůsoben velikosti kulové frézy. Velikost nejmenšího poloměru zaoblení povrchu je 6mm.

Porovnání bylo primárně zaměřeno na rádiusový přechod ve středu obrobku. Tato oblast je v tomto případě nejproblematictější jak je možno vidět na obrázku č. 34. Jak při 3osém tak i při 3+2osém frézování byli upozorováni problémy hlavně v tomto místě. Nástroj nedokáže efektivně využít hranu břitu a vznikají zde neobrobené části. Rozsah stupnice odchylky byl zvolen -50 až +50 μm . Výchozí model je zobrazen na obrázku č.33.



Obrázek 33- Výchozí model

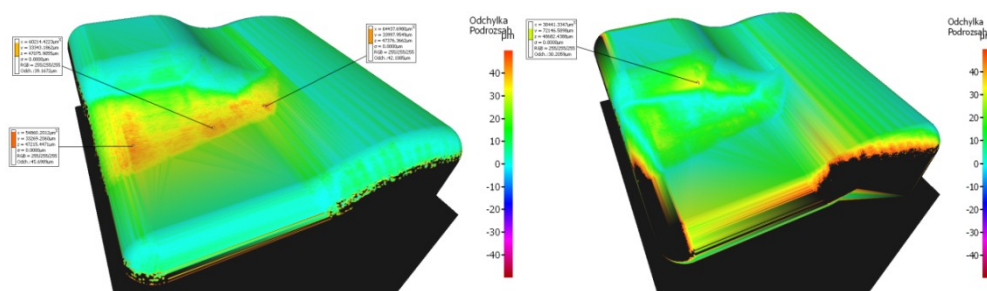
Při pohledu na výsledek porovnání 3osého frézování s výchozím modelem (obr. 34) je možno vidět převládu světle modré barvy. To znamená, že tyto plochy obsahují minimální odchylky od modelu. Jedná se o odchylky v rámci 0 až 10 μm . V problematické oblasti dosahují odchylky hodnot 20-40 μm . Stále však je kvalita povrchu z hlediska přesnosti velmi kvalitní při srovnáním s frézováním 3+2osým.



Obrázek 34 - Porovnání výchozího modelu a 3osého frézování s náklony $0^\circ, 0^\circ$

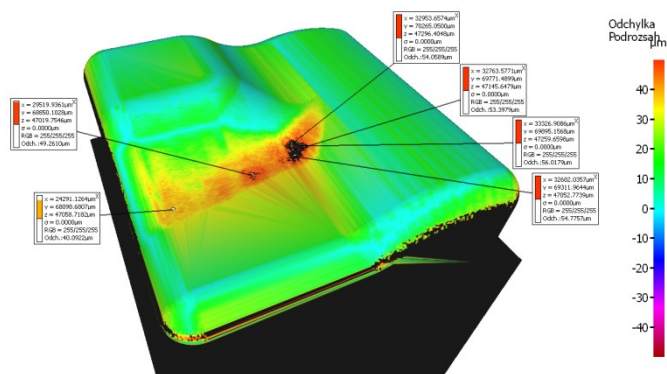
3.1.1 Porovnání 3osého a 3+2osého frézování

Pouze jedna hodnota náklonu zajistila lepší výsledek než u obrábění bez změny polohy osy nástroje vůči obrobku. Jedná se o náklon $20^\circ, 0^\circ$ tedy nástroj je nakloněn o 20° ve směru posuvu nástroje a náklon kolmý na posuv nástroje zůstává na hodnotě 0° .



Obrázek 35 - Porovnání náklonu $0^\circ, 0^\circ$ vlevo a náklonu $20^\circ, 0^\circ$ vpravo

Už na první pohled je vidno, že problematická oblast rádiusu ve středu obrobku je na mnohem lepší úrovni při použití náklonu (obr. 35). V této části převládá světle modrá, až zelená barva což znamená odchylky v rozmezí 0 až 20 μm . Oproti frézování bez náklonu je zde tedy dosahováno lepších výsledků. Naopak jako nejhorší varianta se jeví použití náklonu $10^\circ, -20^\circ$ (obr. 36). Odchylky ve středu obrobku dosahují hodnot vyšších než horní hranice rozsahu stupnice 50 μm .

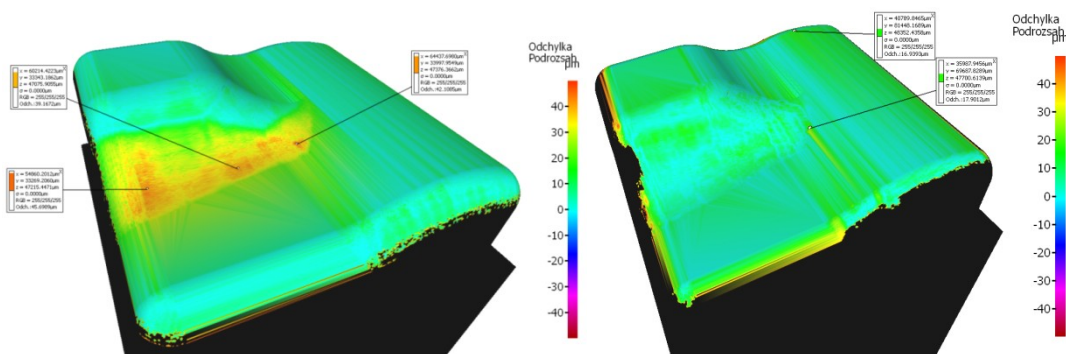


Obrázek 36 - Výsledek porovnání výchozího modelu a modelu při použití náklonu 10°, -20°

Zbylé plochy obrobené s využitím náklonu mají podobnou až stejnou úroveň přesnosti. S ohledem na lepší kvalitu povrchu v problematické oblasti a srovnatelnou úroveň zbylých ploch se z hlediska přesnosti jeví varianta obrábění s náklonem 20°, 0° jako výhodnější. Porovnání histogramů jednotlivých náklonů jen potvrzuje vizuální výsledky. Nejméně procentuálních odchylek mezi 25 až 39 μm je při použití náklonu 20°, 0°.

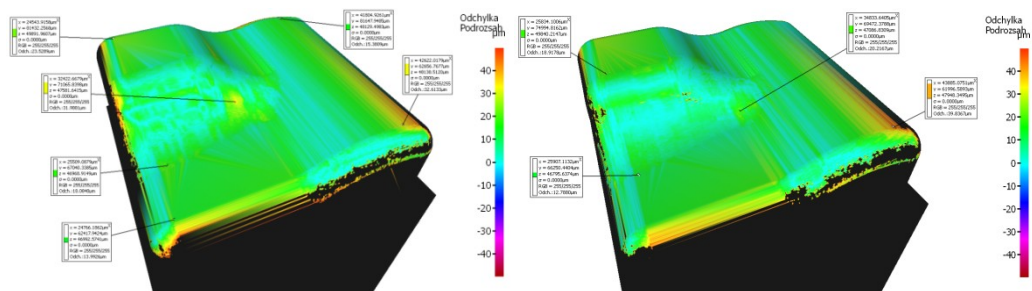
3.1.2 Porovnání 3osého a 5osého frézování

Použitím 5osého frézování bylo dosaženo mnohem lepších výsledků u všech vzorků. Použitím náklonu dokáže nástroj efektivně využít hranu bříty. Díky tomuto dosahují výsledky rádiusu ve středu obrobku lepší úroveň než u 3osého frézování.



Obrázek 37 - Porovnání náklonu 0°, 0° vlevo a náklonu 0°, -10° vpravo

Nejlépe je obrobený vzorek s použitím náklonu 0°, -10°. Při pohledu na výsledky je vidět, že odchylky od modelu se pohybují okolo 0 - 15 μm (obr. 37). Porovnání histogramů potvrdilo, že po použití náklonu 0°, -10° povrch obsahuje nejméně procentuálních odchylek mezi 14 až 50 μm .



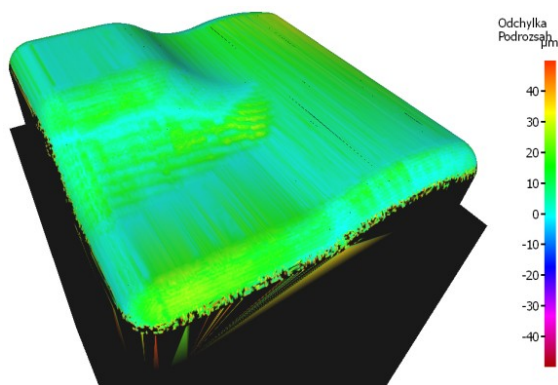
Obrázek 38 - Výsledek porovnání při použití náklonu $15^\circ, -5^\circ$ vlevo a $10^\circ, -15^\circ$ vpravo.

Zatím co u 3osého a 3+2osého frézování se odchylky rádiusu ve středu obrobku výrazně mění, při 5osém frézování je v této oblasti dosahováno mnohem větší přesnosti. Naopak odchylky oblasti mělkého rádiusu na kraji obrobku se výrazně liší při změně náklonu (obr. 38). U 3+2osého frézování tento jev nebyl upozorován. Při 5osém frézování vzniká větší množství odchylek v jiném místě než u 3osého a 3+2osého frézování. Problematická část zobrazena na obrázku č. 41.

Použitím jednotlivých náklonů je dosahováno různých výsledků, avšak nezávisle na hodnotě úhlu. Jednotlivé výsledky porovnání a histogramů jsou k nalezení v příloze.

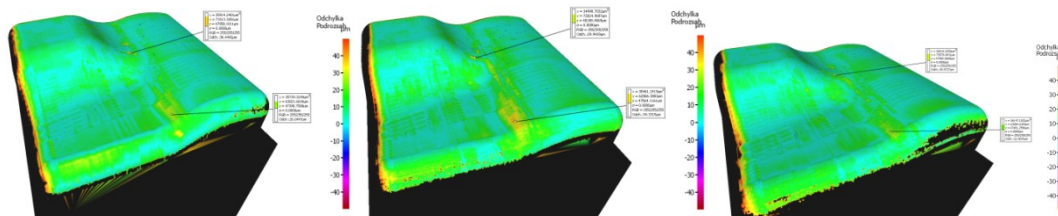
3.2 Porovnání s obrobeným modelem

V programu MasterCam byl vygenerován obrobený model, který byl následně porovnán se vzorky. V podstatě jde o ujištění se, zda program správně počítá jednotlivé dráhy obrábění a zda se na něj můžeme spolehnout. Porovnání proběhlo stejným způsobem, který byl použit u porovnání s výchozím modelem. Opět byl nastaven rozsah stupnice odchylek -50 až +50 μm .



Obrázek 39 - Porovnání obrobku a obrobeného modelu vygenerovaného v programu MasterCam pro 3osé frézování.

Na výsledcích (obr. 39,40) převládá světle modrá až zelená barva. To značí odchylky mezi 0 až 10 μm . Jsou zde i malé oblasti se žlutou až oranžovou barvou tudíž odchylky se blíží k 30 μm . Toto může být způsobeno použitím jednotlivých náklonů. Při výpočtu modelu program MasterCam nepočítá s opotřebením bříty, což také může vést k důvodu vzniku těchto odchylek.

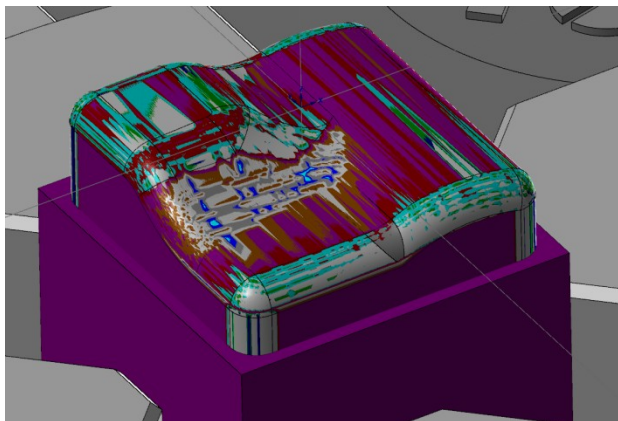


Obrázek 40 – Porovnání obrobků a obrobeného modelu vygenerovaného v programu MasterCam pro 5osé frézování

Realita a model vygenerovaný MasterCamem se bude vždy lišit. Je zde mnoho faktorů, které program do výpočtu nezahrnuje, ale i tak při pohledu na výsledky můžeme s jistotou říci, že program počítá spolehlivě. Pro toto porovnání byly vybrány pouze čtyři náhodné vzorky. Jak bylo předesláno, jde pouze o ujištění se.

3.3 Porovnání s výchozím modelem v programu Mastercam

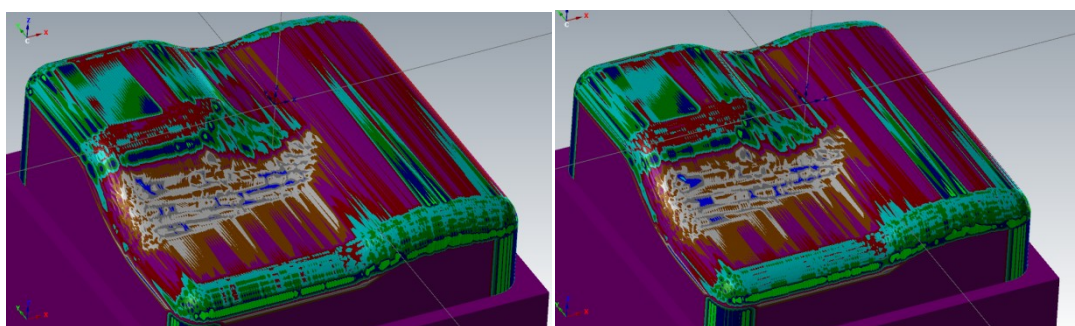
Program MasterCam disponuje možností vlastního porovnání modelu s obrobkem. Tato možnost nám nabízí porovnat výsledky měření s výsledky, které nám vypočte program MasterCam a zjistit míru přesnosti vypočteného modelu. Tolerance byla opět nastavena na 0,0001mm.



Obrázek 41 - Výsledek porovnání výchozího modelu a 3osého frézování vygenerovaný programem MasterCam

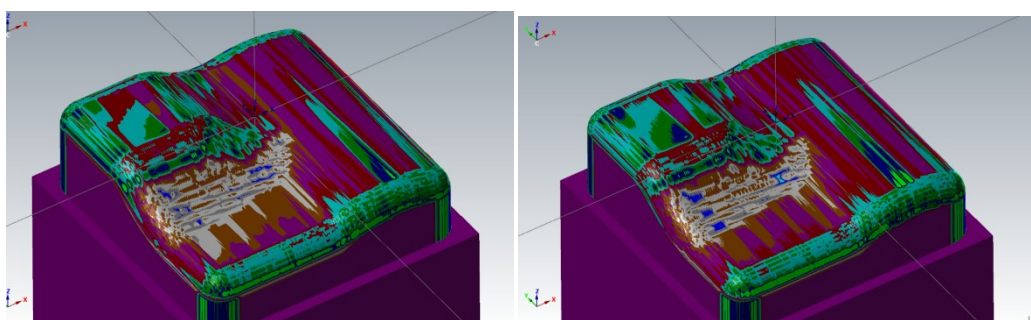
Na obrázku č. 41 je vidět spoustu různě barevných oblastí. Při pohledu na tento výsledek a na výsledek měření je možno si povšimnout shody pouze v problematické oblasti rádiusu. I zde je registrovaná odchylka od modelu 20-40 μm . Ve zbylých částech obrobku se některé odchylky blíží i k dolní hranici rozsahu což nebylo u výsledku z měření zaznamenáno.

Vygenerované modely po 3+2osém frézování v programu MasterCam se od sebe na první pohled příliš neliší. Dokonce i při změně úhlu náklonu se výsledný tvar obrobene plochy nijak radikálně nemění (obr. 42,43). Jednotlivé náklony sice lehce ovlivňují tvar modelu, avšak při porovnání s výsledky z měření se podobnost hledá těžko.



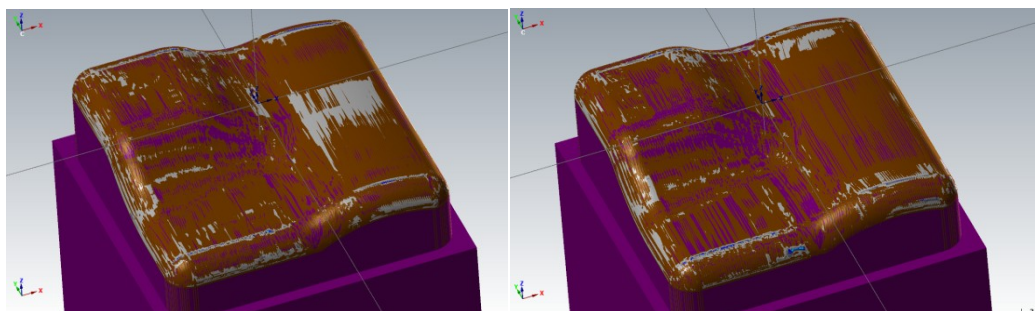
Obrázek 42 – Výsledek porovnání výchozího modelu a 3+2osého frézování vygenerovaný programem MasterCam, vlevo náklon 0°, -20° a vpravo náklon 5°, -15°

Jsou zde i podřezané oblasti. Pouze rádius ve středu obrobku nese známky podobnosti ve velikosti odchylek. Naopak plocha s nejvyšším bodem obrobku obsahuje odchylky, které se blíží dolní hranici rozsahu. Tyto odchylky nebyly ve výsledku z měření zjištěny.



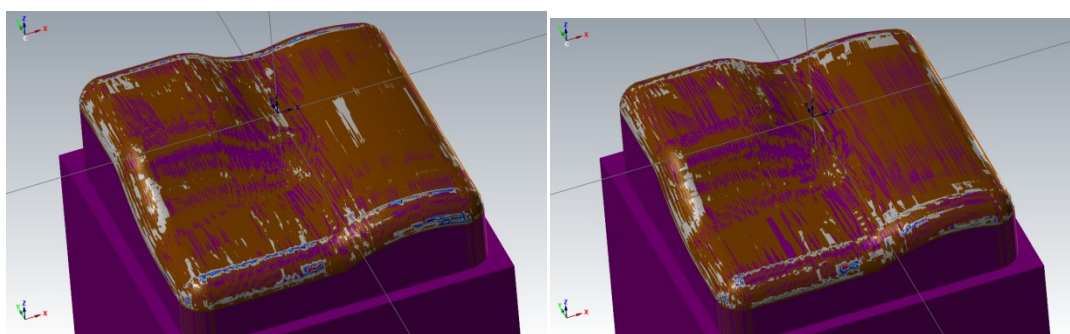
Obrázek 43 - Výsledek porovnání výchozího modelu a 3+2osého frézování vygenerovaný programem MasterCam, vlevo náklon 10°, -20° a vpravo náklon 15°, -5°

Výsledný model po 5tiosém frézování v porovnání s výsledkem měření se v tomto případě obrábění shoduje nejvíce. Odchyly od modelu jsou podstatně menší než u předchozích případů. Dosahované odchyly se pohybují okolo 0 - 15 μ m.

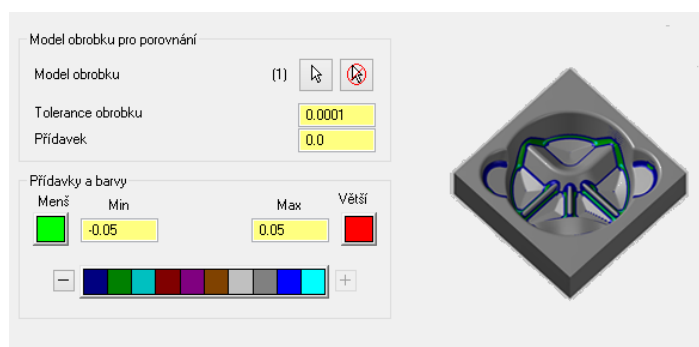


Obrázek 44 - Výsledek porovnání výchozího modelu a 5osého frézování vygenerovaný programem MasterCam, vlevo náklon 5°, -10° a vpravo náklon 10°, -10°

Výsledky se jednotlivými náklony sice mění, avšak ve výsledku je obrobený tvar velice podobný (obr. 44,45). Odchyly na povrchu modelu mají rovnoměrné rozložení a z dosavadního porovnání v programu MastreCam je toto porovnání nejvíce podobné výsledkům z měření. Nastavení porovnání polotovaru je zobrazeno na obr. 46.



Obrázek 45 - Výsledek porovnání výchozího modelu a 5osého frézování vygenerovaný programem MasterCam, vlevo náklon 10°, -20° a vpravo náklon 15°, -20°



Obrázek 46 - Nastavení porovnání polotovaru pro 3osé frézování v programu MasterCam

Z výsledků je možno vidět, že jednotlivé případy porovnání se ne příliš shodují s naměřenými výsledky. Největší podobnost je možno najít u 5osého frézování. Naopak 3osé a 3+2osé frézování se liší ve větší míře. Toto porovnání je taktéž spíše orientační a nelze dávat výsledkům příliš velkou váhu. Pokud bychom se chtěli spolehnout na tyto výsledky, jednalo by se tak v rámci desetin. V případě tohoto experimentu, kdy se odchylky pohybují v rámci mikrometrů, se nelze program MasterCam příliš spolehnout.

3.4 Časové porovnání

Při frézování bez změny polohy osy nástroje vůči obrobku je čas podstatně kratší než u frézování s využitím změny polohy osy nástroje. Z hlediska času je tento způsob rozhodně nejefektivnější.

Frézování 3+2osé se změnou polohy osy nástroje dosahuje časů až 3 krát delších než při frézování 3osém. Různé náklony nemění celkový čas nějak radikálně a pohybují se ve výsledku stejně.

Časové zhodnocení pro 5osé frézování přináší nový pohled na věc. Určité náklony dosahují časů okolo 11 min. To je 2 krát více než u 3osého frézování avšak přesnost obrobené plochy konkuruje kratšímu času. Některé náklony obsahují výjezdy. Tento výjezd je způsoben chybným postprocesorem. Při generování NC kódu postprocesor z neznámých důvodů zahlásí chybu a v určitém bodě nástroj vyjede do bezpečné vzdálenosti, kde se protočí. Poté následuje návrat na původní dráhu obrábění.

Tyto výjezdy byly částečně vyřešeny přidáním funkce cyklus32 do NC kódu. Firma zajišťující nastavení a naprogramování tohoto postprocesoru neodvedla 100% práci a tudíž tato nepříjemnost znehodnotila měření časů u některých náklonů.

3 os			
Úhel náklonu		čas	
0°,0°		5:30 min	
3+2 os			
Úhel náklonu	čas	Úhel náklonu	čas
0°,-5°	14:48 min	10°,-15°	14:46 min
0°,-10°	14:46 min	10°,-20°	14:44 min
0°,-15°	14:45 min	15°,0°	14:45 min
0°,-20°	14:43 min	15°,-5°	14:47 min
5°,0°	14:50 min	15°,-10°	14:45 min
5°,-5°	14:43 min	15°,-15°	14:46 min
5°,-10°	14:46 min	15°,-20°	14:53 min
5°,-15°	14:46 min	20°,0°	14:52 min
5°,-20°	14:45 min	20°,-5°	14:16 min
10°,0°	14:41 min	20°,-10°	14:45 min
10°,-5°	14:48 min	20°,-15°	14:44 min
10°,-10°	14:45 min	20°,-20°	14:49 min
5 os			
Úhel náklonu	čas	Úhel náklonu	čas
0°,-5°	11:28 min	10°,-15°	11:35 min
0°,-10°	11:19 min	10°,-20°	10:51 min
0°,-15°	10:44 min	15°,0°	19:17 min.. 9 výjezdů
0°,-20°	10:41 min...1 výjezd	15°,-5°	13:27 min
5°,0°	15:53 min.. 7 výjezdů	15°,-10°	12:26 min
5°,-5°	23 min.. 15 výjezdů	15°,-15°	17:28 min...2 výjezdy
5°,-10°	11:56 min	15°,-20°	11:03 min
5°,-15°	11:23 min	20°,0°	15:41 min
5°,-20°	10:58 min	20°,-5°	13:38 min
10°,0°	17:38 min.. 9 výjezdů	20°,-10°	12:46 min
10°,-5°	26:40 min...1 výjezd bez cyc32	20°,-15°	11:57 min
10°,-10°	19:35 min...3 výjezdy	20°,-20°	16:46 min ..2 výjezdy

Tabulka 4 - Časové porovnání jednotlivých způsobů frézování

Při rozhodování zda použiji pomalejší způsob s výhodou lepší kvality obrobku nebo půjdu cestou rychlého obrobení avšak na úkor kvality je čistě na zákazníkov. Každý zákazník má své vlastní specifické požadavky a prodejce se snaží vždy vyhovět, pokud je to v jeho silách. 3osé frézování vyniká svou rychlostí naproti tomu 5osé konkuruje kvalitou obrobené plochy, co se přesnosti týče.

4. Závěr

V této diplomové práci byla řešena problematika spojená se zvyšováním přesnosti při frézování tvarových ploch. Celkově bylo vyrobeno 49 zkušebních vzorků na jednom frézovacím centru. Jednalo se o 24 vzorků vyrobených metodou 5osého frézování, 24 vzorků vyrobených metodou 3+2osého frézování a jeden vzorek byl vyroben metodou 3osého frézování. Tyto vzorky byly následně podrobeny analýze přesnosti a porovnány z hlediska odchylek tvaru od výchozího modelu. Analýza přesnosti proběhla na optickém tří-dimenzionálním mikroskopu Alicona Infinite Focus a následně zde byla data i vyhodnocena.

Méně strmé až rovné plochy se vyplatí obrábět metodou 3osého frézování. Tento způsob obrábění dosahuje na takovýchto plochách velice malých odchylek v rámci 0 až 10 μm . Oproti ostatním metodám jsou časy obrábění 2x až 3x kratší což je značná výhoda. Při obrábění strmějších ploch a rádiusů je z hlediska přesnosti výhodnější použít způsob 5osého frézování. Díky efektivnímu využití břitu nástroje je dosahováno menších odchylek v problematických místech. Použití 3+2osého frézování není výhodné z důvodu celkového času obrábění. 5osé frézování dosahuje vyšší přesnosti a nižších časů. Není tedy potřeba použití 3+2osého frézování. Jednotlivé náklony mají různé výsledky. Nebyla však zpozorována žádná závislost jednotlivých úhlů na velikosti odchylek. S jistotou je však možno říct, že hodnota náklonu 0° , -10° je z dosažených výsledků nejlepší. Porovnání histogramů jen potvrzuje toto tvrzení. Náklon obsahuje procentuálně nejvíce odchylek mezi 1 až 9 μm a nejméně odchylek mezi 14 až 50 μm .

Záleží především na zákazníkovi jakou kvalitu povrchu, co se přesnosti týče, požaduje. V dnešní době plně složitých tvarů se rozhodně vyplatí použití metody 5osého frézování. V případě obrábění méně strmých ploch lze použít 3osé frézování, využít rychlost obrábění a zachovat tak i kvalitu obrobku.

Tato práce se zabývala přesností obrobené plochy. Co se týče kvality obrobeného povrchu z hlediska drsnosti, je zde prostor v rámci další diplomové práce se touto problematikou zabývat. Pouze pro zajímavost byla změřena drsnost 3osého a 5osého brábění. 3osé frézování dosahovalo hodnot R_a μm , R_z μm a plošné drsnosti S_a μm . Hodnoty 5osého frézování se pohybovali okolo R_a μm , R_z μm a S_a μm .

Seznam obrázků

<i>Obrázek 1 - Frézování tvarových ploch podle orýsování</i>	<i>11</i>
<i>Obrázek 2 - Tvarové frézy</i>	<i>12</i>
<i>Obrázek 3 - Tvarová fréza složená.....</i>	<i>12</i>
<i>Obrázek 4 - Otočný stůl</i>	<i>13</i>
<i>Obrázek 5 - Obrysové kopírování</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 6 - Prostorové kopírování.....</i>	<i>14</i>
<i>Obrázek 7 – Znázornění os na CNC obráběcím centru</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 8 - Souřadný systém.....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 9 - Typické příklady obrábění kulovou frézou</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 10 - vztahné body</i>	<i>18</i>
<i>Obrázek 11 - Jednotlivé vrstvy při odebírání materiálu</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 12 - Znázorněné výstupky na povrchu obrobené plochy.....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 13 - Souřadnicový systém 5osého obrábění.....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 14 - Kinematika 5osých obráběcích strojů s koncepcí stůl-stůl.....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 15 - Kinematika 5osých obráběcích strojů s koncepcí halva-hlava</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 16 - Efektivní využití radiusu nástroje</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 17 - příklad 5osého obrábění.....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 18 - Ukázka frézování standardním způsobem a znázornění efektivního průměru frézy... </i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 19 - Způsoby frézování s nakloněným nástrojem, a) naklonění ve směru posuvu, b) naklonění ve směru kolmém na posuv.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 20 - Naklonění ve směru posuvu (tažený nebo tlačенý nástroj)</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 21 - Naklonění ve směru kolmém na posuv</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 22 - Univerzální 5osý frézovací stroj DMG MORI DMU 50.....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 23 - Upnutý polotovár v čtyř-čelistovém sklíčidlu na sloupu</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 24 - Čelní fréza pro frézování do rohu CoroMill® 390</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 25 - Náhled na obrobek po první části hrubování</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 26 - Monolitní karbidová stopková fréza CoroMill® Plura pro frézování do rohu</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 27 - Náhled na obrobek po hrubování(vlevo vygenerovaný model v MasterCamu, vpravo reálné foto).....</i>	<i>31</i>
<i>Obrázek 28 - Monolitní karbidová stopková fréza CoroMill® Plura s kulovým čelem.....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 29 - Hydraulický adaptér HSK se sklíčidlem CoroChuck™ 930.....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 30 - Schéma experimentu.....</i>	<i>33</i>

<i>Obrázek 31 - Měřicí pracoviště Alicina</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 32 - Pohled na naskenovaný povrch.....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 33- Výchozí model</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 34 - Porovnání výchozího modelu a 3osého frézování s náklony 0°,0°</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 35 - Porovnání náklonu 0°,0° vlevo a náklonu 20°,0° vpravo</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 36 - Výsledek porovnání výchozího modelu a modelu při použití náklonu 10°,-20°</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 37 - Porovnání náklonu 0°,0° vlevo a náklonu 0°,-10° vpravo</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 38 - Výsledek porovnání při použití náklonu 15°,-5° vlevo a 10°,-15° vpravo.</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 39 - Porovnání obrobku a obrobeného modelu vygenerovaného v programu MasterCam pro 3osé frézování.</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 40 – Porovnání obrobků a obrobeného modelu vygenerovaného v programu MasterCam pro 5osé frézování.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 41 - Výsledek porovnání výchozího modelu a 3osého frézování vygenerovaný programem MasterCam.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 42 – Výsledek porovnání výchozího modelu a 3+2osého frézování vygenerovaný programem MasterCam, vlevo náklon 0°,-20° a vpravo náklon 5°,-15°</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 43 - Výsledek porovnání výchozího modelu a 3+2osého frézování vygenerovaný programem MasterCam, vlevo náklon 10°,-20° a vpravo náklon 15°,-5°</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 44 - Výsledek porovnání výchozího modelu a 5osého frézování vygenerovaný programem MasterCam, vlevo náklon 5°,-10° a vpravo náklon 10°,-10°.....</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 45 - Výsledek porovnání výchozího modelu a 5osého frézování vygenerovaný programem MasterCam, vlevo náklon 10°,-20° a vpravo náklon 15°,-20°</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 46 - Nastavení porovnání polotovaru pro 3osé frézování v programu MasterCam</i>	<i>41</i>

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 - Řezné podmínky pro první část hrubování</i>	<i>30</i>
<i>Tabulka 2 - Řezné podmínky pro druhou část hrubování</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 3 - Řezné podmínky dokončovacího cyklu.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 4 - Časové porovnání jednotlivých způsobů frézování.....</i>	<i>43</i>

Seznam použité literatury

- [1] POČÍTAČOVÁ PODPORA VÝROBY. In: *Studijní opora* [online]. Ostrava: Marek Sadílek, 2011, s. 80 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/346/cs/studium/studijni-literatura/Pocitacova-podpora-vyroby.pdf>
- [2] ŘEŠENÉ PRAKTICKÉ PŘÍKLADY V CAM SYSTÉMU MASTERCAM. In: *Učební text předmětu „CAD/CAM systémy v obrábění“ a „CAD/CAM systémy v obrábění II“* [online]. Ostrava: Marek Sadílek, 2012, s. 169 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/346/cs/studium/studijni-literatura/Sadilek-Kosar-Resene-practicke-priklady-v-CAM-systemu-MasterCAM.pdf>
- [3] Počítačová podpora procesu obrábění. In: *Učební text* [online]. Ostrava: Marek Sadílek, Zuzana Sadílková, 2012, s. 149 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/459/ucebniopory/Pocitacova_podpora_procesu%20_obrazeni.pdf
- [4] *Frézování tvarových ploch* [online]. In: . Ostrava, 2008, s. 4 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=24567&instance=2>
- [5] DOLEŽEL, ONDŘEJ. *ANALÝZA TECHNOLOGIE VÝROBY TVAROVÝCH PLOCH FRÉZOVÁNÍM* [online]. Brno, 2009 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16370
- [6] *FRÉZOVÁNÍ JEDNODUCHÝCH TVAROVÝCH PLOCH* [online]. In: . s. 4 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=29713&instance=2>
- [7] FRÉZOVÁNÍ TVAROVÝCH PLOCH NA OTOČNÉM STOLE. *Strojirenstvi-frezovani* [online]. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://strojirenstvi-frezovani.blogspot.cz/2011/03/282-frezovani-tvarovych-ploch-na.html>
- [8] Frézování tvarových ploch. *ELUC* [online]. 2015 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1233>
- [9] Progresivní metody v obrábění. In: *Studijní opora* [online]. Ostrava: Josef BRYCHTA, Marek SADÍLEK, Robert ČEP, Jana PETRÚ, 2011, s. 128 [cit. 2017-

- 05-14]. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/019/dokumenty/Progresivni_metody_v_obrabeni_FINAL.pdf
- [10] OHNIŠŤOVÁ, PETRA. *PĚTIOSE FRÉZOVÁNÍ S POLYNOMIÁLNÍ TRAJEKTORIÍ* [online]. Brno, 2014 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=86049
- [11] HODNOCENÍ STAVU OBROBENÉHO POVRCHU PO VÍCEOSÉM FRÉZOVÁNÍ. In: *2.mezinárodní podzimní školu povrchového inženýrství projektu Integrita* [online]. Ostrava: doc. Ing. Marek SADÍLEK, Ph.D., 2016, s. 35 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/4871777-Hodnoceni-stavu-obrobeneho-povrchu-po-vicosem-frezovani.html>
- [12] SERVUS, Bc. TOMÁŠ. *TRENDY VÝVOJE UPÍNÁNÍ ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ* [online]. Brno, 2009 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=18086
- [13] MUŽÍK, Josef. *Návrh přípravků pro úpravu a měření mikrogeometrie břítu* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/11025/4234/1/DP_Muzik_Josef.pdf
- [14] Frézování tvarových ploch sdruženými posuvy. In: *M.L. Geardesigns* [online]. 2015 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: http://nd06.jxs.cz/366/808/0c670c160c_100643958_o2.jpg
- [15] Tvarové frézy. In: *Tumlikovo* [online]. Copyright © 2010 TumliKOVO, 2011 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/wp-content/uploads/2010/11/tvarov%C3%A9-fr%C3%A9zy.jpg>
- [16] Tvarová fréza složená. In: *ELUC* [online]. 2015 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/uploads/images/15620/content_frez_slozenymi_frezami.png
- [17] Naklápěcí otočný stůl. In: *Učíme v prostoru* [online]. 2013 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: http://uvp3d.cz/drtic/wp-content/uploads/2014/07/UvP_STROJ_ST52_001_013.jpg.jpg
- [18] Frézování kopírováním. In: *ELUC* [online]. 2015 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/uploads/images/17492/content_kopirovani.jpg
- [19] Prostorové frézování. In: *ELUC* [online]. 2015 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/uploads/images/23044/content_prostorove_frezovani_kopie.png

- [20] Ukázka os frézovacího centra. In: *ADATE* [online]. Copyright © 2017 ADATE, 2017 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.adata.cz/images/mcg-5x/MCG-CNC-03.jpg>
- [21] Třiosý souřadnicový system. In: *Gamebanana* [online]. 2016 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: https://38.media.tumblr.com/tumblr_m75r13XMzui1rqjp8c.jpg
- [22] Ukázka 5osého frézování. In: *Youtube* [online]. 2013 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: https://i.ytimg.com/vi/SC_CPYvxzIA/maxresdefault.jpg
- [23] Ukázka frézování standardním způsobem. In: *Docplayer* [online]. 2013 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/docs-images/25/4871777/images/10-0.jpg>
- [24] Čelní fréza pro frézování do rohu CoroMill® 390. In: *Sandvik coromant* [online]. 2012 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/Pages/productdetails.aspx?c=r390-036c3-11m050>
- [25] SADÍLEK, Marek. *Výzkum změny polohy osy nástroje při víceosém frézování*. Ostrava, 2012. Habilitační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [26] Monolitní karbidová stopková fréza CoroMill® Plura pro frézování do rohu. In: *Sandvik coromant* [online]. 2012 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/Pages/productdetails.aspx?c=2s221-0600-100-ng%20h10f>
- [27] Monolitní karbidová stopková fréza CoroMill® Plura s kulovým čelem. In: *Sandvik coromant* [online]. 2012 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/pages/productdetails.aspx?c=r216.42-06030-ap06g%201620&m=5743393>
- [28] Adaptér HSK se sklíčidlem CoroChuck™ 930. In: *Sandvik coromant* [online]. 2012 [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: 2- <http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/products/Pages/productdetails.aspx?c=930-ha06-s-20-100>

Seznam příloh

Příloha 1 – ZIP: Výsledky porovnání s výchozím modelem